



## 음압병실에서 공조시스템 급배기 위치 개선에 따른 호흡기 감염병 공기전파 저감 효과 평가

*Evaluation of the Airborne Transmission Reduction Effect of Respiratory Infectious Diseases by Improving the Supply Air and Exhaust Air Position of the Air Conditioning System in a Negative Pressure Room*

유정연\* · 김철\*\* · 배상환\*\*\*

Jungyeon Yu\* · Chul Kim\*\* · Sanghwan Bae\*\*\*

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

\*\* Coauthor, Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pukyong National Univ., South Korea (chulkim@pknu.ac.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:** In this paper, we intend to devise a plan to minimize the infection of medical staff through droplet particles generated from the patient's respiratory by improving the location of the supply and exhaust ports in the negative pressure room. **Method:** To this end, the first improvement plan was analyzed through CFD simulation. Based on this, a final improvement plan was derived and the effect of improvement was evaluated by measuring and visualizing the concentration of droplet-like particles in a mock-up of a negative pressure room. **Result:** As a result of the final improvement plan being derived and evaluated, firstly, through visualization, in the ceiling air supply and exhaust condition, which is the existing plan, drop-like particles generated from the patient's respiratory position diffuse to the respiratory position of the medical staff in a considerable amount, whereas in the ceiling supply and side exhaust conditions, which are the final improvement plan, most of the drop-like particles are transferred to the side exhaust port. It was confirmed with the naked eye that it quickly escaped and barely reached the respiratory position of the medical staff. In the case of the final improvement plan, compared to the existing plan, the concentration of droplet-like particles was reduced by 91% at the location near the respiratory of the medical staff and by 86% at the center of the room, confirming that it is a very effective plan to prevent the spread of respiratory infectious diseases to the medical staff.

## KEYWORD

음압병실  
호흡기감염병  
공기전파  
공조시스템  
급배기 위치Negative Pressure Rooms  
Respiratory Infectious Diseases  
Airborne Transmission  
HVAC System  
Supply Air and Exhaust Air Position

## ACCEPTANCE INFO

Received Mar. 30, 2023  
Final revision received May. 3, 2023  
Accepted May. 8, 2023

© 2023. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

## 1.1. 연구의 배경 및 목적

코로나19 팬데믹은 우리의 일상에서 생활방식을 전면적으로 바꾸었다. 수많은 사람들이 코로나19에 감염되어 치료를 받았고 대다수가 일상에서 매일 보호를 위해 마스크와 소독제를 사용하고 있다. 위드 코로나의 시작과 더불어 매일 수천명의 감염자가 발생하는 가운데, 중증환자의 증가는 의료진과 의료시스템의 치료수용역량에 큰 부담을 주고 있다[1]. 특히 음압병실 (Negative Pressure Room) 은 코로나19 외에도 다양한 질병으로 인한 중증환자들의 필수적인 시설로 반드시 충분한 수가 확보와 안전한 환경보장이 필수적이다. 일반적으로 음압병실은 공기의 압력차를 이용해 방역적 측면에서 주변공간과 차단하며 감염병 환자들의 치료시 인접공간으로 바이러스 확산을 차단하는 방식을 사용한다. 하지만 음압병실 내부에서 HVAC시스템의 운영에 따른 공기감염 위험에 대해서는 아직까지 많은 연구가 수행되지 않았다.

따라서 본 연구는 음압병실에서 의료진의 안전한 환경을 보장하기 위해 HVAC시스템의 설계방법에 따른 공기 중 기류형성과 바이

러스 제거효과를 분석하였다. 코로나 19 호흡기 감염병의 확산으로 의료시설에서 음압병실의 수요는 크게 증가하였다. 그러나, 음압병실에서 급배기구의 위치는 환자의 호흡기에서 발생시키는 바이러스를 포함한 비말이 의료진의 호흡기에 유입되지 않도록 추가적인 개선이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 음압병실에서 급배기구 위치를 개선하여 환자의 호흡기에서 발생한 비말입자의 흡입을 통한 의료진의 2차 감염을 최소화 할 수 있는 방안을 도출코자 한다.

## 1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 음압병실에서 공기감염 바이러스 치료시 감염자로부터 공기 중으로 토출되는 바이러스의 실내 확산을 제어하기 위해 HVAC 시스템의 급배기구 배치 방식을 차별화하였다. 분석사례는 첫째, 음압병실의 일반적인 기계환기장치 설치방법인 천정 급배기 방식을 적용하여 HVAC시스템 가동시 기류거동과 호흡기 발생 비말을 통한 바이러스 확산 및 제거 효율을 분석하였다. 둘째, 의료진 등 음압병실 출입 인원의 공기감염 위험을 최소화하기 위해 동일 풍량의 배기구를 환자 침대 상부 측면벽체로 이동하여 설치했을 때 토출된 바이러스의 이동 경로 및 제거효율을 확인하였다. 먼저, 병실 내 호흡기 감염병 바이러스에 관한 기류발생과 입자거동을 분석하기 위해 음압병실 1개 유닛을 대상으로 CFD시뮬레이션을 수행하였으며, 조건별로 호흡기로부터

터 발생한 에어로졸 사이즈의 입자가 공기 중에서 확산 거동하는 분포와 공조환기장치를 통한 제거효과를 확인하였다. CFD시뮬레이션 결과를 바탕으로 추가 개선방안을 도출하였다. 최종 개선안은 배기구를 벽체에 설치하고 환자 호흡기 상단에 천장에 급기구를 추가하여 의료진방향으로의 확산을 최소화하였다. 최종 개선안은 음압병실 목업의 구축을 통해 현장실험으로 그 효과를 평가하였다. 기존 천정 급배기 방식과 천정급기/측면배기 방식에 대하여 조건별로 호흡기 비말유사 입자의 확산거동을 고출력 레이저를 통하여 가시화하고 비말유사 입자 농도 분포의 측정을 통해 개선효과를 비교·평가하였다.

## 2. 공기감염과 의료시설 환기기준

### 2.1. 공기 중 바이러스 전파 가능성

의료시설에서 공기 중 바이러스 전파 관련 연구는 다음과 같다. Zhou et al. (2021)의 연구에서는 런던 병원의 공공 공간과 감염자에 의해 사용되는 7개 클리닉 공간을 대상으로 공기샘플을 채취한 바 있다[2]. 검사결과, 총 31개 공기 샘플중 14개 샘플(38.7%)에서 COVID-19 RNA가 발견되었으며, 코로나 감염자가 사용하는 공간에서 더 높은 비율로 바이러스가 검출되었다. 또 다른 사례로 Razzini et al. (2020)의 연구에서 이탈리아 밀란의 코로나19 격리 병동을 대상으로 공기검체를 수집한 결과 오염공간인 격리 병실과 복도에서 바이러스 양성반응이 확인하였으며, 반면 준오염지역(탈의실)이나 청정구역에서는 바이러스가 발견되지 않아 감염자로부터의 공기 중 바이러스 발생을 증명하였다[3]. Lednicky et al. (2020)은 코로나19 감염자 병원을 대상으로 에어로졸에서 COVID-19 바이러스의 존재를 확인하였다[4]. 공기 샘플은 한 개의 병실에서 2명의 감염자로부터 2~4.8m 격리된 위치에서 채취되었다. 공기 샘플에서 검출된 바이러스 균주(virus strain)를 분석한 결과 격리 중인 환자의 바이러스와 일치함을 확인하였다. 이 연구는 감염환자의 호흡기를 통해 배출된 에어로졸이 바이러스 확산경로로 이용될 수 있음을 증명하였다. 이러한 선행연구의 결과들은 병원 내 감염자 입원시 주변 공간들이 감염자에서 배출된 에어로졸에 의해 바이러스 전파 가능성이 있음을 의미한다.

김준영(2020)은 음압격리병실에서 전실과 음압병실간의 실압차와 배기구 위치에 따라 음압병실로부터 전실로의 실간 오염공기 유출 특성을 시뮬레이션을 통해 평가하였다[5]. 또한, 송경석 외(2022)은 2차 감염 예방을 위한 음압수술실의 급배기구 변경에 대한 연구에서 음압수술실의 급기를 천정에 배기를 측면벽체 하단의 4면에 라인형태로 배치하여 기존 측면 급/배기 방식에서보다 2차 감염을 유발하는 실내 유해물질이 저감될 수 있음을 증명하였다[6]. 권순정 외(2022)에서도 수술실에서 공조용 급배기구 위치 선정에 관한 연구에서 수술실의 급배기구 위치에 따른 기류분포를 시뮬레이션을 통해 해석하여 수술시 발생하는 공기 중 부유 세균 및 진균을 효과적으로 제거할 수 있는 급배기구 선정 모델을 제안하였다[7]. 그러나, 해당 연구는 환자가 수술중인 상태로 환자의 말하기 등의 적극적인 바이러스 배출 조건은 아니다. 호흡기 감염병 환자를 격리하는 음압격리병실의 경우, 환자 문진시 환자의 말하기로 인한 바이러스 배출이 증가하고 문진을 하는 의료진 호흡기와의 근접하게 되므로 이에 대한 평가 및 개선안에 대한 필요성이 발생한다.

따라서 호흡기 감염병 환자 격리를 위한 음압병실에서 의료진의 2차 감염을 방지하기 위해 감염자에 의해 배출되는 비말과 에어로졸에 대해 HVAC시스템의 급배기구 위치 개선을 통한 효과적인 대응방안이 연구될 필요가 있다.

### 2.2. 의료시설 환기기준

현재 음압격리병실은 보건복지부(2018) 「음압격리병실 설치 및 운영세부기준(지침)」에 따라 설계되어야하며, 최소 15m<sup>3</sup> 이상의 병실 면적과 급배기구에 HEPA filter 또는 역류를 통한 감염병 확산 방지를 위한 기밀댐퍼(airtight back draft damper) 설치해야 한다[8]. 또한 음압병실은 비음압구역과 최소 -2.5 Pa의 압력차를 유지하고 병상 및 전실공간은 시간당 최소 환기횟수 6회 이상을 준수해야만 한다. 병실 내 틈새와 창문 등은 밀폐작업을 통해 공간 사이 바이러스 이동을 최소화하도록 조치하고 있다. 해외 기준으로 미국의 경우, ASHRAE Standard 170-2021 (2021)에서 의료시설 내 필수 환기횟수를 규정하고 있다[9]. 일반병실 및 중환자병실의 경우 최소 필터효율은 MERV14이상을 요구하며 외기기준 2ACH, 총환기량 기준 4-6ACH를 요구한다. 한편, AII (Airborne Infection Isolation)공간들에 대해서는 HEPA등급 이상의 필터와 외기기준 2ACH, 총환기량 기준 12ACH 이상의 환기횟수를 달성해야한다. AII공간은 코로나19 공기 중 전파와 같이 감염자와 5 μm이하의 에어로졸에 의한 공기전파를 막기 위한 공간이다. 현재 의료시설의 기계설비기준은 실내 공간 사이의 감염병의 확산을 막고 환자를 포함한 재실자의 안전을 위해 제시되었다는 점에서 의의가 있으나 병실 내 HVAC시스템의 급배기 계획에 따른 제거효율 및 디자인 방안에 대해 구체적인 안을 제시하지 않고 있다는 점에서 개선의 여지가 있다.

## 3. 시뮬레이션 분석모델을 통한 설계안 평가

### 3.1. 시뮬레이션 분석 모델

음압병실 내부의 바이러스 확산모델 분석을 위해 본 연구에서 사용된 시뮬레이션 모델은 보건복지부(2018) 기준을 참고하였다[8]. 음압병실의 크기는 3.905m×4.05m (15.81m<sup>2</sup>), 높이는 2.8m이며, 병실 내 의료용 침대는 크기 2.1m×1m, 높이 0.7m로 Fig. 1.과 같이 구성하였다. 음압병상이 있는 공간에서 재실자는 1인의 환자와 2인의 의료진을 포함하여 3인으로 구성하였고, 인체모형의 크기는 1.74m로 2019년 성인평균키를 기준으로 하였다[10]. 시뮬레이션 모델의 세부 구성 및 경계 및 분석조건은 Table 1.과 같다[10-14]. 감염 환자의 호흡기 바이러스 배출 속도는 “말하기” 상태로 설정하여 5.2m/s를 적용하였다[13]. 급배기구 설정조건은 기존안인 CASE1에서는 HVAC 시스템의 급기구를 천장에서 문측에 배치하고, 배기구는 천장에서 환자 머리 위쪽에 배치하였다. 개선안인 CASE2에서는 배기구의 위치를 측면 벽체에서 환자의 호흡기 뒤쪽으로 배치하였다. 또한, 모든 경우에서 배기는 100% 배출하여 재순환되지 않도록 하였다.

연구에서 사용된 CFD모델은 Star-CCM+ 시뮬레이션 프로그램을 사용 하였으며, 적절한 Mesh 수를 구성하기 위해 여러 Size의

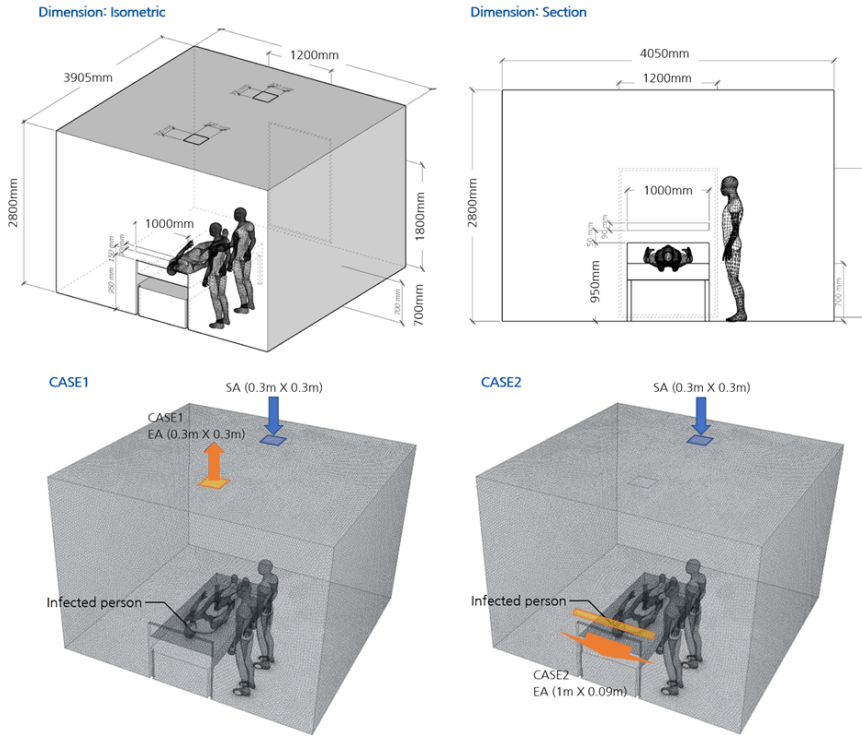


Fig. 1. CFD Modeling for Simulation Cases

Table 1. CFD simulation modeling configuration

	Description	Ref.
Human Models	174cm (1 patient, 2 medical staff)	[10]
Air Change Rate	12 ACH	[11]
Supply Air (SA)	500CMH, 1.698m/s, 24°C	
Exhaust Air (EA)	500CMH/Ea, 1.698m/s, 24°C	
Human Temperature	30.95°C	[12]
Physics Settings	- Realizable K-Epsilon High y +Wall Treatment - Lagrangian Multiphase (One-Way)	
Particle Settings	Breath Velocity: 5.2m/s	[13]
	Particle Size: 5µm (Aerosol) Particle Rate: 1000 set/s Particle Shape: Spherical Particles Particle Type: Liquid (Bis sebacate (C26H50O4)) Viscosity: ca 23mPa s at 20°C Density: 900kg/m <sup>3</sup> Particle wall condition : rebound	[14]
Mesh Settings	Palyhedral Mesh Prism Layer Mesh Surface Remesher	

Mesh를 테스트 하였으며, Mesh의 품질, 분석의 수렴도, 분석 시간 등을 고려하여 Mesh 수를 각각의 케이스별로 약 150만개로 구성하였다. 음압병실의 환기횟수는 12ACH로 충분한 환기량이 보장되는 환기조건에서 공간 내 바이러스 확산을 가정하였으며 병실 출입문 등을 포함한 틈새를 통한 침기는 포함하지 않았다.

에어로졸 크기의 입자거동 특성은 비말유사입자 실험 등에서 모니터링을 하기 위해 사용되는 Bis sebacate (C26H50O4)를 오염입자로 이용하여 바이러스 입자와 유사한 조건으로 분석을 수행하였

다. 또한 바이러스의 시험 입자량은 실제 호흡시 분출 입자수를 고려해야하지만 CFD분석의 특성상 실제 입자수 반영시 과도한 입자 수량으로 인해 많은 시간과 계산이 소요되므로 특정 값을 설정하여 사용하였다. 입자 분석 시 입자의 거동에 영향을 미치지만 입자는 유체에 영향을 주지 않는 One-way 방법을 사용하였으며, 또한 벽면의 입자 경계조건은 rebound로 설정 하였다.

### 3.2. 음압병실 공기 중 기류거동 특성

공기조화장치의 급배기 운영에 따른 음압병실의 기류거동에 대한 CFD 모델링 결과 현재 대다수의 음압병실에서 사용 중인 급배기 구성방식인 천정부 급배기 방식 CASE1에서는 천정에 설치된 배기 (EA) 디퓨저에 의해 음압침상 주변의 실내기류 흐름이 결정되었다. 일례로 Fig. 2의 CASE1 A-A'단면(배기구 단면)에서는 배기구 인근에서 일부 와류 발생을 확인하였으며 감염자로부터 토출된 비말이나 에어로졸이 근거리에서 기류를 타고 의료진을 거쳐 다시 흘러 상부 배기구를 통해 배출되는 것을 기류 흐름을 통해 확인할 수 있었다.

반면, B-B'단면(급기구 단면)에서는 급기로 인한 수직하강 기류를 중심으로 양측면에서 수직 순환하는 와류가 발생하였고 C-C'단면(문-침상 단면)에서는 급기를 통해 공급된 공기가 침상부로 흘러 최종적으로 배기되는 흐름을 확인할 수 있었다. 또한 출입문 인근 일부와 및 환자 침상인근에서 와류가 형성되었다. CASE1의 CFD분석 결과는 음압병실의 입원환자 상부에 천정형 배기구 계획시 환자로부터 배출된 호흡기 배출물이 수직기류를 타고 의료진의 호흡기방향으로 전달될 가능성이 있는 것으로 분석되었다.

Fig. 2의 CASE2는 배기구를 천정에서 침대 상부로 옮겼을 때 A-A'단면(배기구 단면)에서는 여전히 기류가 침상 우측 직상부로



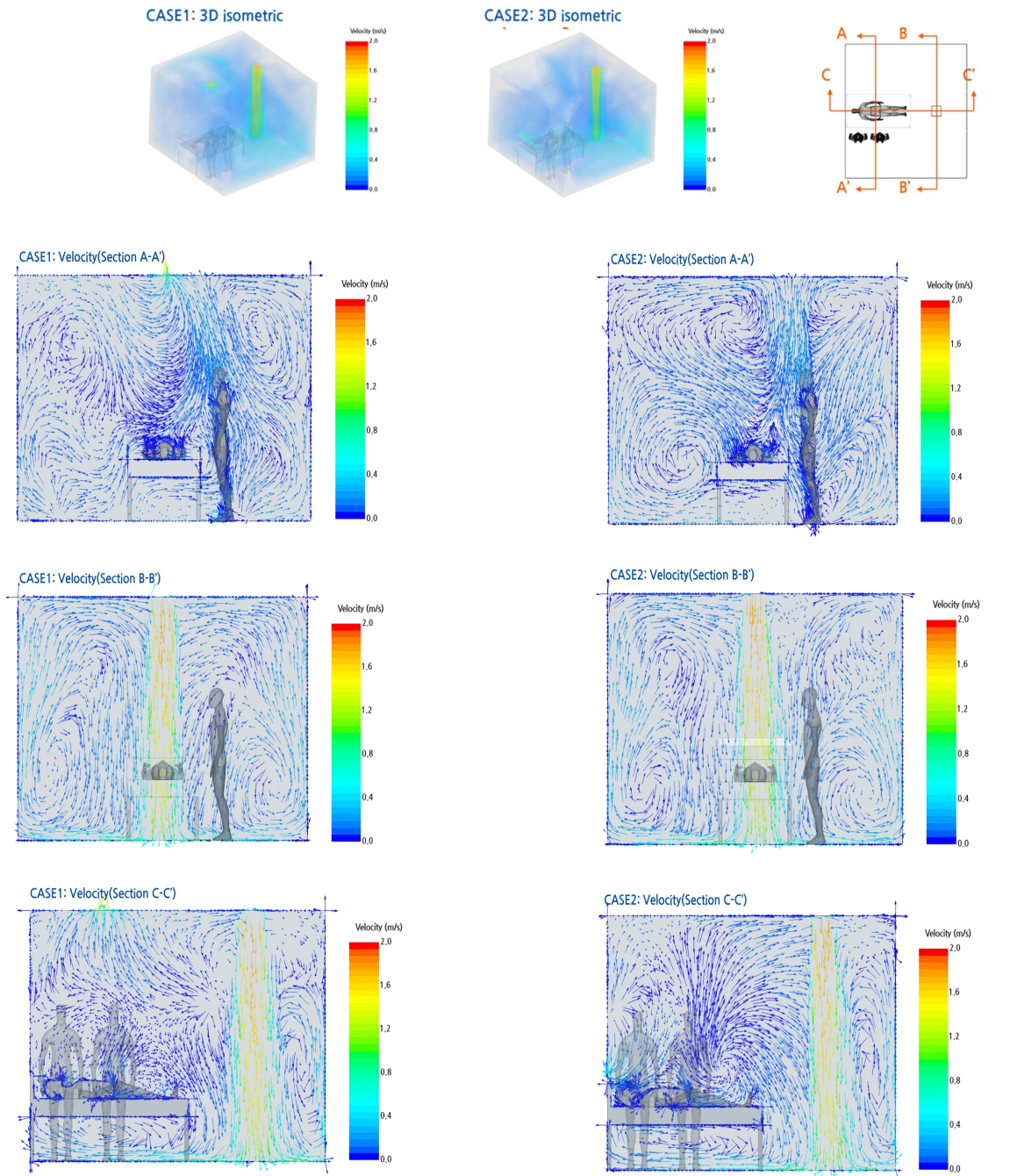


Fig. 2. Indoor Airflow and Speed Rates by improving the supply and exhaust position

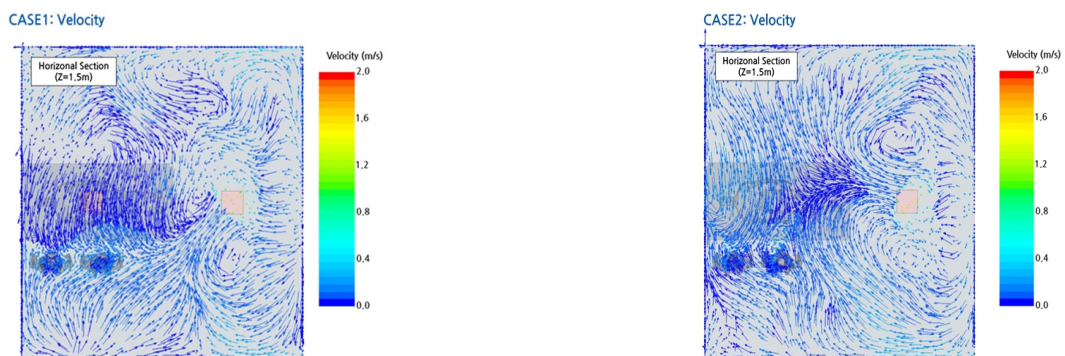


Fig. 3. Horizontal Section of Indoor Airflow by improving the supply and exhaust position

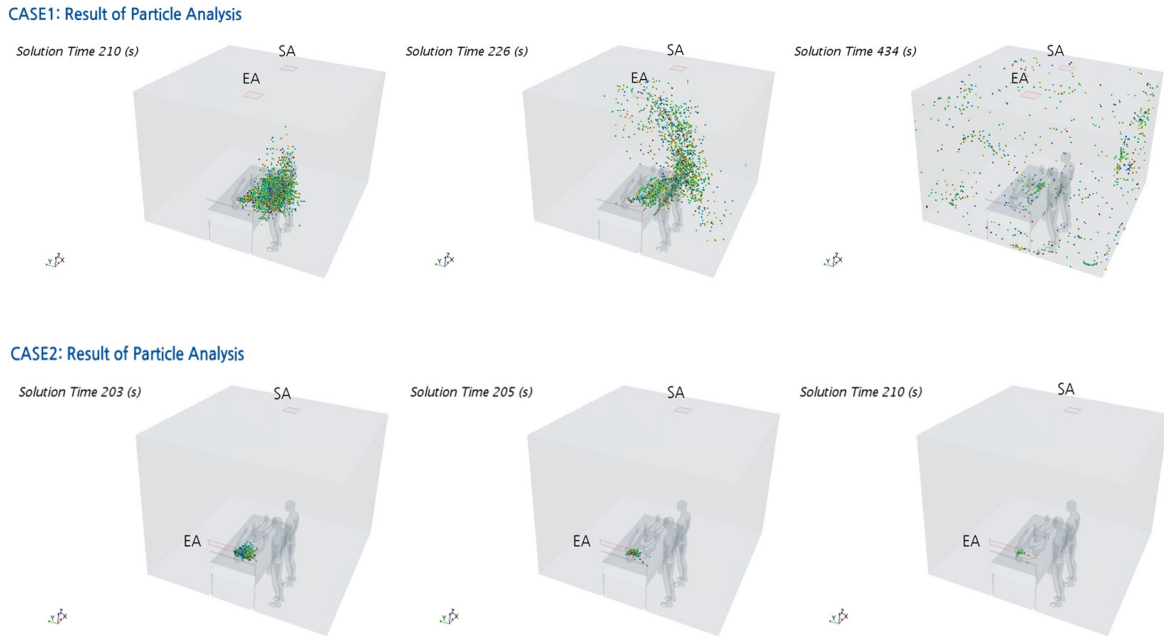


Fig. 4. Airborne Contaminant Behaviors by improving of the supply and exhaust position design

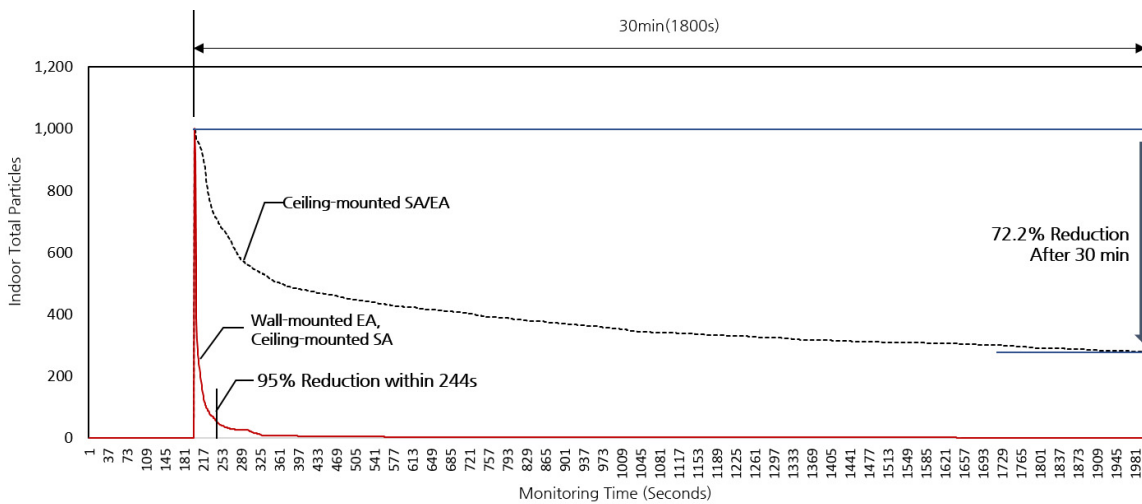


Fig. 5. Airborne Contaminant Removal Performance by designs

흘러 와류가 발생하고 있으나 배기구를 천정에서 침대 상부로 이전함에 따라 수직 기류의 속도가 일부 감소하고 침상 상단 벽부의 배기구로 인해 환자의 머리측 기류거동이 증가한 것을 확인할 수 있었다.

또한 B-B'단면(급기구 단면)에서는 토출 부 양측으로 상부와 하부에 와류 발생하고 좌우상단부에 와류 형태가 상대적으로 분명해진 것을 확인할 수 있었다. C-C'단면(문-침상 단면)에서는 침대 상단 벽부배기 기류의 영향으로 재실자 주변의 기류 패턴이 더 강해진 것이 확인되었으며 특히, 환자 호흡기 인근 기류는 대부분 의료침대 상부로 배기기류가 형성되었다. CASE2에서는 침대 상단부 배기구로 인해 의료진 앞측에서 상대적인 기류속도의 증가가 나타났으며 환자를 둘러싼 음압병실 내 기류변화가 유도되는 것으로 확인할 수 있었다. 따라서 감염자의 호흡기에서 배출된 비말 및 에어로졸이 감염자의 호흡선 높이에서 근거리에서 배출될 가능성이 기존 CASE1보다 높은 것으로 예측된다.

한편 Fig. 3.은 의료진의 호흡선 높이인 1.5m 높이에서 평면기류의 거동을 보여준다. 의료진의 호흡선 높이에서 노출 가능성을 확인할 때 환자 CASE1과 CASE2 모두 배기구 위치의 변화에도 환자 측으로부터 의료진 방향으로 기류가 형성되고 있음을 나타내고 있다. 따라서 환자의 호흡기로부터 바이러스를 포함한 비말이나 에어로졸을 배출시 감염원 인근에서 즉각적으로 처리하지 못할 경우 의료인이나 다른 방문자에게 잠재적 노출 위험을 줄 수 있다. 따라서 음압병실 설계 및 운영시 개인보호장비 착용과 더불어 실내기류에 의한 바이러스 노출 가능성과 효과적인 억제 방안 등에 대해 고려할 필요가 있다.

### 3.3. 음압병실 공기 중 바이러스 입자거동 특성

음압격리병실에서 공기조화설비의 가동시 급배기구의 설계에 따른 실내기류의 변화를 4.1장에서 확인하였다. 본 장에서는 감염자가 호흡기로부터 에어로졸 크기인  $5\mu\text{m}$  크기의 바이러스 유사입자 방



출시 HVAC시스템 배기구 설치에 따른 공기 중 입자거동과 시간경과에 따른 제거효과를 분석하였다. HVAC시스템은 CASE1(상부배기), CASE2(벽부배기)를 대상으로 CFD 모델에서 200초동안의 기류 안정화 후 입자를 방출하고 30분동안 병실 내 입자분포 및 잔여입자갯수를 비교하였다.

Fig. 4.는 CFD 입자확산 분석결과를 시간에 경과에 따라 시각화한 것이다. CASE1에서 천정에서 상부배기를 할 때 감염자 호흡선으로부터 발생된 공기 중 오염물질이 상승기류를 타고 의료진에게 전달될 가능성을 다시 확인하였다. CASE1의 경우, 환자로부터 토출된 바이러스 유사 입자가 수 초 이내 입자가 의료진에게 확산 및 전달되었으며 일정시간 경과 후에도 음압병실에 잔여 입자가 남아 실 전체로 퍼지는 경향이 나타났다.

Fig. 4.의 CASE2는 음압병실에서 벽으로 배기할 경우, 오염입자가 감염원으로부터 인접한 배기구로 수 초 이내에 바로 배출되어 의료진 등 인접한 재실자에게 거의 주지 않고 제거되는 것으로 나타났다. 감염자가 병실 내에서 최소 며칠에서 여러 달 이상 장기입원이

가능한 점을 고려할 때, 음압병실 내에 공기 중 바이러스 입자를 단 시간에 지속적으로 배출되지 않으면 실내에 누적되거나 의료진 등 방문자들에게 2차로 노출될 우려가 있다.

마지막으로, Fig. 5.은 감염환자가 바이러스 토출 후 30분 동안의 모니터링을 통해 공기조화설비의 제거능력을 확인한 것이다. CASE1에서 입자를 1회 토출시 30분 경과 후 병실공간 내 잔여입자의 갯수는 278개(27.8%)로 비교적 많은 양의 입자가 배출되지 못하고 실내에 남아있는 것으로 드러났다. 반면, CASE2에서 의료침대 벽부에 배기를 설치한 경우는 동일 모니터링 시간동안 공기 중 잔여입자의 갯수는 0개로 초기 수분 이내로 거의 모든 입자가 제거 되는 것으로 분석되었다. 무엇보다 4~5분 이내에 공기 중 입자의 95% 이상이 제거되어 장기 재실자의 안전과 의료진의 건강을 보장하는데 큰 효과가 있을 것으로 기대되었다.

설계안의 변경에 따른 기류 속도의 영향은 급기영역을 제외한 영역에서 0.1~0.5m/s로 풍속에 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구는 음압격리병실의 바이러스 공기감염위험을 줄이기 위해 현재 사용되는 천정부 급배기 시스템보다 오염원 인근의 벽면이나 병상의 헤드 부분 등에 배기 디퓨저를 설치하여 의료진 및 음압병실의 바이러스 확산을 억제하는 것이 보다 효과적인 안으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 추가 개선 및 음압병실 목업 평가

##### 4.1. 추가개선안 도출 및 음압병실 목업

시뮬레이션 평가 후, 최종 개선안을 도출하였다. 환자 머리 위쪽 천정에 급기를 추가하여 의료진의 호흡기 위치로 상승하며 확산되는 바이러스를 효과적으로 억제할 수 있도록 개선하였다. 최종 개선안 및 기존 운영안은 음압병실 목업에서 평가되었다. 음압병실 목업의 크기는 4.05m×3.905m×2.8m로 시뮬레이션 음압병실과 동일하다. 급배기 풍량 및 환기횟수도 동일하게 각각 500CMH, 환기횟수 12ACH로 설정하고 음압 -2.5Pa을 유지하도록 HVAC 시스템을 가동하였다. 환자가 “말하기” 상태에서 호흡기를 통해 발생하는 비말을 가정하여, 입자발생기의 비말유사입자의 배출 속도가 5.2m/s가 되도록

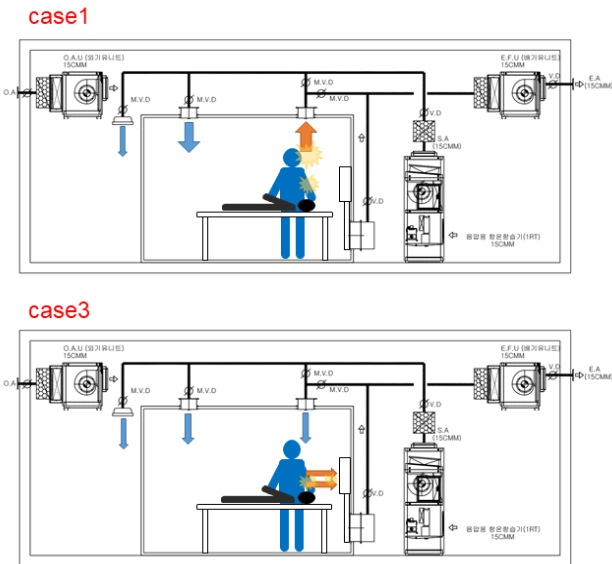


Fig. 6. Existing design (CASE1) and final improvement design (CASE3) for supply and exhaust position in negative pressure room mock-up

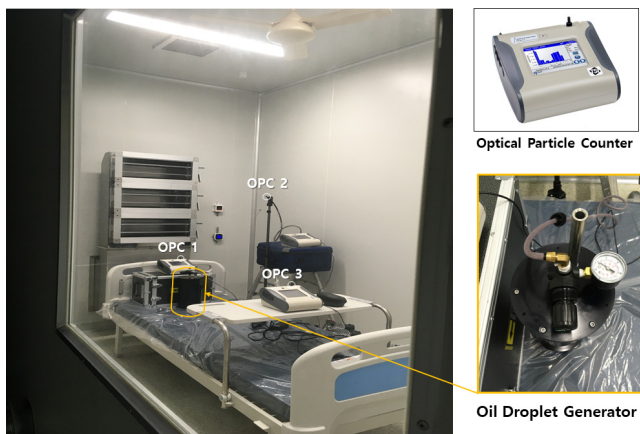


Fig. 7. Position of Optical Particle Counter (OPC) and Oil droplet generator

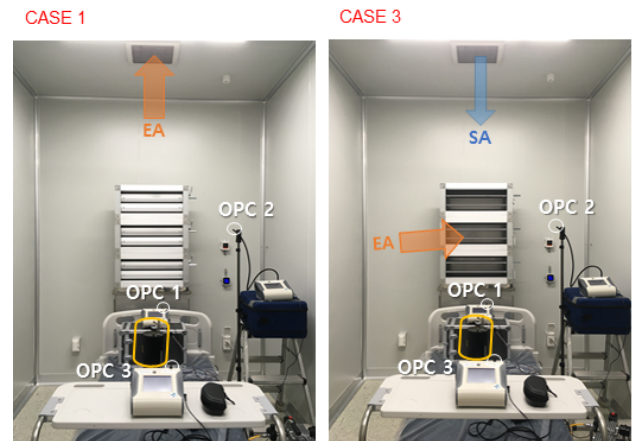


Fig. 8. Experimental appearance in mock-up of negative pressure ward by design cases

록 노즐을 조정하였다[13]. Fig. 1.과 같이 급배기구는 병실 외측에 급기구 1개, 음압병실 내부에 급기구 및 배기구가 설치되어 있다. 급배기구 위치별 비말유사입자 거동 분포를 평가하기 위하여 병실 천정에 급배기구 2개, 환자 뒤쪽 측면에 배기구 1개를 설치하였다.

평가 조건은 Fig. 6.과 같이 기존 음압병실 조건(CASE 1)에서는 천장에 급/배기구가 모두 위치하고 있고 전실 및 병실 입구에 급기되고 환자 머리위쪽으로 배기가 이루어진다. 반면, 음압병실 최종 개선안(CASE 3)에서는 전실에 급기구 1개 및 천장에 위치한 2개의 급기구에서 급기가 되고 환자 호흡기 상단 측면 벽체에 위치한 배기구를 통해 배기가 이루어진다.

음압병실 목업에서 전실과 병실 간 차압이 -2.5Pa로 유지될 때, 급배기총량은 500CMH로 동일하게 설정한 상태에서, 총배기량 기준 CASE1에서 전실의 급기비율은 15%, 병실내 급기비율은 85%을 나타내었다. 이에, CASE3에서도 급기뎀퍼를 조정하여 전실 급기 비율은 15% 수준으로 동일하게 설정하고 병실내 입구쪽 급기 비율

은 45%, 환자측 급기 비율은 40% 수준으로 설정하였다. 급배기구 위치별 호흡기 바이러스의 공기중 확산을 모사하기 위하여 Fig. 7.과 같이 비말유사입자 발생장치(Oil droplet generator, TSI 9307)을 환자의 호흡기 위치에 설치하였다. 발생하는 비말유사입자의 크기는 0.3um~10um 이며, 비말유사입자 측정은 광학식 입자개수 측정장치(Optical Particle Counter, OPC, TSI 3330) 3대를 환자 호흡기 인근 위치(OPC1), 의료진 호흡기 인근 위치(OPC2) 및 실 중앙(OPC3)에 설치하였다.

실험방법은 각각의 CASE에 대하여 비말유사입자를 5분간 분사하고 분사를 멈춘 후 잔여 농도 변화를 추가로 10분이상 측정하였다. 또한, 각 CASE별로 비말유사입자 확산거동을 가시화하여 환자의 호흡기에서 발생한 에어로졸이 의료진으로 전파되는 것이 얼마나 효과적으로 방지할 수 있는지를 확인하기 위하여 10W 고출력 레이저를 이용하여 비말유사입자의 확산 양상을 촬영하였다.

#### 4.2. 급배기구 위치별 비말유사입자 거동 가시화 결과

먼저, 급배기구 위치 개선에 따른 비말유사입자를 10W 고출력 레이저를 통해 가시화 하였다. Fig. 9.에서 비말유사입자는 주황색 점선 안에 주로 분포하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9.에서와 같이 CASE1에서는 환자의 호흡기 위치에서 발생한 비말유사입자가 천장에 위치한 배기구의 영향으로 위로 상승하여 의료진의 호흡기 인근으로 확산되는 양상을 나타내었다. 그러나, CASE3의 경우 환자의 호흡기 상부 천장에서 급기가 이루어지고 환자의 호흡기 뒤쪽 측벽에서 배기되기 때문에, 호흡기위치에서 발생한 비말유사입자가 급기와 배기의 영향으로 인하여 측면 배기구로 바로 배출되어 의료진 호흡기 주변에는 비말유사입자가 거의 도달하지 않는 것을 가시적으로 확인할 수 있다.

#### 4.3 급배기구 위치별 비말유사입자 농도 측정 결과

급배기구 위치 개선에 따른 비말유사입자 농도분포 측정 결과, 일반 음압병실 조건인 CASE1에서 환자의 호흡기 인근 위치(OPC1)에서 측정된 비말유사입자 농도의 최대값은 339  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 의료진 호흡기 인근 위치(OPC2)에서는 2,212  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 실 중앙(OPC3)에서는 3,168  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다. 비말유사입자 농도는 호흡기 인근 위치에서는 입자발생장치의 토출속도 및 천장 배기구의 흡입 효과로 인하여 상대적으로 낮은 값을 나타내었고 의료진 호흡기 위치 및 실중앙의 농도가 더 높은 값을 나타내었다. 입자농도는 입자가 분사되는 5분동안 지속적으로 상승하여 최대값을 나타내었고 이후 감소하였다. 실중앙(OPC3)농도의 최대값 대비 95% 수준인 154  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  까지 감소되었을 때, 시간은 10분 40초를 나타내었다. 입자분사 종료후 5분 40초가 경과한 시점이었다. 반면, 최종 개선 음압병실 조건인 CASE3에서는 환자 호흡기 인근 위치(OPC1)에서는 농도 최대값이 375  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 의료진 호흡기 인근 위치(OPC2)에서는 707  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 실중앙(OPC3)에서는 186  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었다. 이 경우에는 Fig. 9.의 가시화 결과에서도 볼 수 있듯이, 호흡기 위치에서 발생한 비말유사입자가 천장 급기 및 측면 배기의 영향으로 입자발생장치에서 토출되는 즉시 배기구로 빠져나가게 되어 전체적인 농도 분포가 CASE1에 비하여 매우 낮은 값을 나타낸 것으로 분석된다.

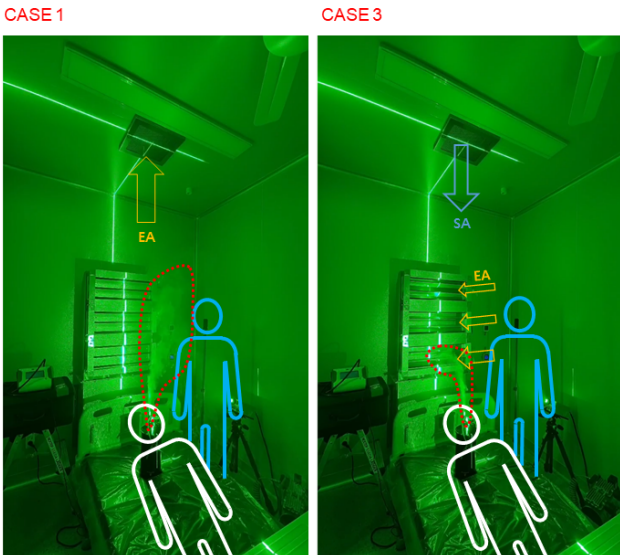


Fig. 9. Distribution of droplet-like particle behavior by design cases

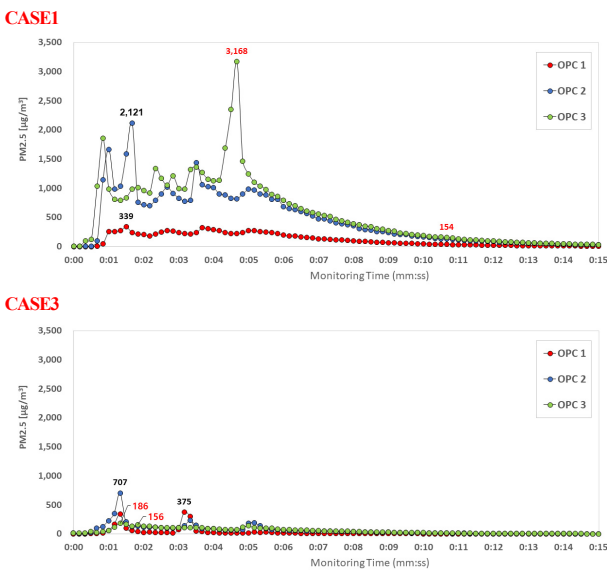


Fig. 10. Distribution of droplet-like particle concentration by design cases

의료진 호흡기 인근(OPC2)에서의 평균 입자농도는 CASE1에서  $597 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나 CASE3에서는  $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 크게 감소하여 기존 대비 91% 개선된 것으로 나타났으며, 실 중앙(OPC3) 평균 입자농도는 CASE1에서  $470 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나 CASE3에서  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 크게 감소하여 기존 대비 86% 개선된 것으로 나타났다.

## 5. 결론

음압병실은 코로나19 확산과 더불어 지속적인 수요가 발생하고 있다. 음압병실은 입원환자의 장시간 거주 가능성과 밀폐된 치료환경의 특성상 병실 내 공기를 통한 2차 감염을 억제하도록 계획될 필요가 있다. 이를 위해 본 연구는 음압병실의 HVAC 시스템의 급배기구 위치 개선을 통해 병실내 공간에서 바이러스 확산방지 방안을 검토하였다. 먼저, 1차 개선안에 대하여 CFD 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 이를 바탕으로 최종 개선안을 도출하여 음압병실 목업에서 비말유사입자 농도 측정 및 가시화를 통해 호흡기 감염병 확산방지를 위한 개선 효과를 평가하였다.

CFD분석 결과 음압병실 급배기구 계획시 천정 배기방식보다 입원환자에 인접한 벽부 배기구 계획방식이 감염자로부터 배출되는 바이러스의 공기 확산을 효과적으로 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 최종 개선안을 도출하여 음압병실 목업에서 비말유사입자 거동평가실험을 수행하였다. 먼저, 가시화를 통해 기존안인 천정 급배기 조건에서는 환자의 호흡기 위치에서 발생한 비말유사입자가 의료진의 호흡기 위치로 상당량 확산되는 반면, 최종개선안인 천장 급기 및 측면 배기 조건에서는 비말유사입자가 대부분 측면 배기구로 빠르게 빠져나가 의료진의 호흡기 위치에 거의 도달하지 않는 것을 육안으로 확인 할 수 있었다. 최종개선안의 경우 기존안 대비 의료진 호흡기 인근 위치에서는 비말유사입자 농도가 91% 저감되고, 실 중앙에서는 86% 저감되어 의료진으로의 호흡기 감염병 전파를 방지하는데 매우 효과적인 방안을 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과는 향후 음압병실의 공기조화설비 계획시 공기 중 감염으로부터 보다 안전한 환경을 조성하기 위해 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## Acknowledgement

본 연구는 2022년도 과학기술정보통신부의 연구비 지원으로 수행된 한국건설기술연구원 주요사업 연구결과의 일부입니다. (과제번호: 20220238-001). 또한, (사)한국생태환경건축학회 2022년도 추계학술발표대회 논문인 “음압병실에서 급배기구 위치 개선을 통한 의료진의 호흡기 감염병 전파 저감 효과 평가” 연구결과의 확장으로 수행되었습니다.

## References

[1] J.R. M. Black et al., COVID-19: the case for health-care worker screening to prevent hospital transmission, *The Lancet*, 395(10234), 2020, pp1418-1420.  
 [2] J. Zhou et al., Investigating Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) surface and air contamination in an

acute healthcare setting during the peak of the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) pandemic in London, *Clinical Infectious Diseases*, 73(7), 2021, e1870-e1877.  
 [3] K. Razzini et al., SARS-CoV-2 RNA detection in the air and on surfaces in the COVID-19 ward of a hospital in Milan, Italy, *The Science of the Total Environment*, 742, 2020, p.140540.  
 [4] J.A. Lednicky et al., Viable SARS-CoV-2 in the air of a hospital room with COVID-19 patients, *International Journal of Infectious Diseases*, 100, 2020, pp.476-482.  
 [5] 김준영, 홍진관, 음압격리병실 실압차와 배기구 위치에 따른 오염공기 유출에 대한 수치해석, 대한설비공학회 논문집, 제32권 제1호, 2020, pp.1-2. // (J.Y. Kim, J.K. Hong, A numerical analysis on contaminant air leakage according to pressure difference and exhaust location of negative pressure isolation room, *Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 32(1), 2020, pp.1-2.)  
 [6] 송경석, 김선혜, 의료진 2차 감염 예방을 위한 음압수술실의 급배기구 변경. 대한건축학회논문집, 제38권 제4호, 2022, pp189-197. // (K.S. Song, S.H. KIM, Alteration of supply and exhaust diffusers in a negative pressure operating room to prevent secondary infection of surgical team, *Journal of architectural institute of korea*, 38(4), 2022, pp.189-197.)  
 [7] 권순경, 주영철, 김천숙, 수술실내 공기감염억제를 위한 공조용 급배기구 위치 선정에 관한 연구, 한국의료복지건축학회 논문집, 제8권 제1호, 2022, pp.7-12. // (S.J. Kwon, Y.C. Joo, C.S. Kim, On the diffuser location for the reduction of airborne infection in operation room, *Journal of The Korea Institute of Healthcare Architecture*, 8(1), 2022, pp.7-12.)  
 [8] 보건복지부, 음압격리병실 설치 및 운영세부기준(지침), 2018. // (MOHW, Detailed standards for installation and operation of negative pressure isolation wards, *Medical Service Act. Ministry of Health and Welfare*. 2018.)  
 [9] ASHRAE. ASNI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2021, Ventilation of health care facilities, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021.  
 [10] NHIS, National health checkup data, National Health Insurance Service, 2020.  
 [11] US CDC, 2003, Guidelines for environmental infection control in health-care facilities : Recommendations of CDC and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee(HICPAC)  
 [12] J.H. Yang, A study on skin temperature distribution of the human body as fundamental data for developing heat energy harvesting clothing, *The Korean Society for Emotion & Sensibility*, 2011, 14(3), pp.435-444.  
 [13] Z. Lei et al., Simulation and evaluation of respirator faceseal leaks using computational fluid dynamics and infrared imaging, *The Annals of Occupational Hygiene*, 57(4), 2013, pp.493-506.  
 [14] Thermo Fisher Scientific, Safety data sheet, 2010, 2010.05.24.