

# A Numerical Study on Pressure Fluctuation and Air Exchange Volume of Door Opening and Closing Speeds in Negative Pressure Isolation Room

음압격리병실에서의 병실 문의 개폐속도에 따른 실간 압력변동 및 공기교환량에 대한 해석적 연구

Kim, Jun Young\* 김준영 | Hong, Jin Kwan\*\* 홍진관

## Abstract

**Purpose:** In this study, through the comparison of the pressure fluctuation and air exchange volume in negative isolation room according to the type of the door and door opening/closing speeds, which is one of the main factors causing the cross contamination of the negative pressure isolation room, establishes standard operating procedures to prevent cross contamination in high risk infectious diseases and isolation room design. **Methods:** In this study, the air flow each of the room is analyzed using ANASYS CFX CODE for flow analysis. In addition, the grid configuration of the door is constructed by applying Immersed Solid Methods. **Results:** The pressure fluctuation due to the opening and closing of the hinged door was very large when the moment of the hinged door opened and closed. Especially, at the moment when the door is closed, a pressure reversal phenomenon occurs in which the pressure in the isolation room is larger than the pressure in the anteroom. On the other hand, the pressure fluctuation due to the opening and closing of the sliding door appeared only when the door was closed, but the pressure reversal phenomenon not occurred at the moment when the sliding door was closed, unlike the hinged door. As the opening and closing speed of the hinged door increases, the air exchange volume is increased. However, as the opening and closing speed of the sliding door is decreased, the air exchange volume is increased. **Implications:** According to the results of this study, it can be concluded that the pressure fluctuation due to the opening and closing of the hinged door is greater than the pressure fluctuation due to the opening and closing of the sliding door. In addition, it can be confirmed that the pressure reversal phenomenon, which may cause to reduce the containment effect in negative pressure isolation room, is caused by the closing of the hinged door. Therefore, it is recommended to install a sliding door to maintain a stable differential pressure in the negative isolation room. Also, as the opening and closing speed of the hinged door is slower and the opening and closing speed of the sliding door is faster, the possibility of cross contamination of the room can be reduced. It is therefore necessary to establish standard operating procedures for negative isolation room for door opening and closing speeds.

**Keywords** Negative Pressure Isolation Room, Pressure Reversal Phenomenon, Air Exchange Volume, Cross Containment, Standard Operating Procedure

**주 제 어** 음압 격리병실, 압력역전현상, 공기교환량, 교차오염, 표준운영절차

## 1. Introduction

2002년 SARS, 2009년 H1N1, 2015년 MERS 등 국내에서 전염성 높은 질병들은 계속해서 발생되고 있다. 이러한 고

\* Master's Course, Department of HVAC & Firefighting Engineering, Gachon University (Primary author: wnsdudooao@naver.com)

\*\* Professor, Ph.D. Department of HVAC & Firefighting Engineering, Gachon University (Corresponding author: jkhong@gachon.ac.kr)

위험 신종감염성으로 인해 전 세계적으로 감염병에 대한 불안감은 상승되고 있다. 특히 우리나라에서는 2015년 MERS 발생으로 인해 186명의 감염자와 38명의 사망자가 발생하였다. 예상치 못한 MERS 발생으로 국가지정 음압격리병상의 중요성이 부각되었고 공중보건위기를 효율적으로 대응하기 위해서 시설의 확충필요성이 제기되었다. 2015년 기준으로 16개시,도의 19개병원을 국가지정 입원치료병원으로 지정하여 119개의 음압병상을 운영되고 있으나 MERS 발생이후 확충정책에 따라 음압격리병실의 추가적인 설치를 진행하고 있다.

여기서 음압격리병실은 격리실과 전실을 음압으로 유지하면서 AIA Guideline<sup>(1)</sup>에서 최소 2.5 Pa, Victoria<sup>(2)</sup>의 기준으로 최소 15 Pa의 압력차를 이용하여 음압격리병실에서의 감염균의 확산을 방지하도록 설계·시공되고 있으나 문의 종류, 문의 개폐속도, 의료진의 이동동선 및 이동속도 등 여러 가지 요인으로 인해 오염물질의 확산이 일어날 수 있는 소지가 여러 연구<sup>(4-7)</sup>를 통해 보고되고 있다.

질병관리본부의 2016년 MERS 대응지침<sup>(3)</sup>에 나와 있는 MERS 감염자 통계에 따르면 총 감염자의 44.1%가 입원 또는 내원 시 감염된 환자이며, 32.8%가 환자가족을 포함한 간병인, 의료진이 13.4%로 나타났다. 이에 따라 MERS 감염의 주요원인이 병원 내에서 발생된다는 사실을 통해 음압격리병실의 시설 및 운영에 개선이 필요하다는 점이 대두되고 있다.

따라서 음압격리병실 내에서 2차 감염을 방지하기 위해서 그 주요원인에 대한 보다 더 면밀한 파악이 필요하다. J.W.Tang et al은 문의 움직임에 따른 와류(Vortex)의 발생과 실간 온도구배에 대한 Two-way buoyancy flow에 의한 음압의 일시적인 역전현상을 통해 음압격리병실의 차폐가 일시적으로 깨질 수 있다는 사실을 보여주고 있다<sup>(4)</sup>. 또한 P. Kallionmaki et al은 실제 크기의 격리실과 전실 및 마네킹을 사용한 보행자 모델링을 통하여 일정한 문의 개방속도와 보행자가 이동하는 조건에서 보행자의 유무, 문의 종류, 격리실의 환기횟수 및 실간 압력차 등 여러 요인들을 변화시켜 실험을 수행하였다. 이 때 격리실과 전실 사이의 일정량의 가스를 분사하여 실간 공기교환량을 실험적으로 측정하여 음압격리병실의 공기유동을 분석한 바 있다<sup>(5)</sup>. 조는 음압격리병실에서 의료진의 이동과 슬라이딩 문의 개폐속도에 따라 격리실에서 전실로 유동하는 공기의 유출을 확인하였다<sup>(6)</sup>. J. Adams et al은 음압격리병실의 최소 차압기준인 2.5 Pa 보다 더 큰 차압을 형성해야 격리실에서 이동하는 오염공기의 유출이 감소한다고 분석한 바 있으며, 실 간 차압이 15 Pa인 경우라도 보행자의 이동에 따라 실간 공기교환이 이루어 질 수 있다는 연구<sup>(7)</sup>를 진행한 바 있다.

현재 대부분의 음압격리병실의 문은 슬라이딩 자동문을 사용하고 있지만 아직까지 기존에 사용되고 있던 힌지 문을 그대로 이용하고 있는 음압격리병실이 다수 있으므로 문의 종류에 따른 실간 압력변동 및 공기유동에 대한 해석을 통한 감염관리 측면에서의 분석이 필요하다. 또한 문의 종류에 따른 압력변동 및 공기유동해석에 대한 국내의 연구가 부족한 시점에서 문의 움직임 자체에 따른 봉쇄효과의 정도를 확인할 필요가 있다.

이에 따라, 본 연구에서는 격리실 권장 환기횟수인 12회/h<sup>(8)</sup>의 조건에서 음압격리병실과 전실 사이의 문의 종류 및 문의 개폐속도의 변화를 통해 전실과 음압격리병실에서 발생하는 압력 변화와 보행자가 없는 상태에서 격리병실과 전실에서 문의 개폐로 인해 발생하는 실간 공기교환량을 CFD Simulation을 통해 비교분석하였다. 이를 통해, 음압격리병실 설계와 공기감염 고위험 신종감염병 발생 시 교차오염방지를 위한 병실운영 표준운영절차(SOP) 수립을 위한 자료 및 음압격리병실에서 문의 설치 및 설계에 관한 기준 작성 시에 활용하고자 한다.

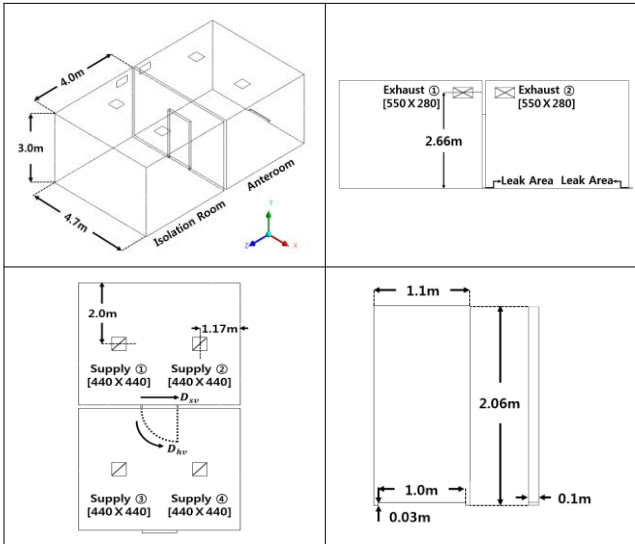
## 2. Method of Research

### 2.1 Modeling

본 연구에서는 유동해석을 위하여 ANSYS CFX CODE<sup>(9)</sup>를 이용하여 음압격리병실과 전실의 공기유동을 해석하였다. 문의 격자구성은 Immersed Solid Methods<sup>(10)</sup>를 적용하여 문의 개폐의 해석모델로 설정하였다. 해석공간은 [Figure 1]과 같이 세로 4.7 m, 가로 4.0 m, 높이 3.0 m의 크기로 격리실과 전실을 동일한 크기로 구분하여 설정하였다. 배기구에는 문에서 발생하는 공기의 유동에 영향을 주지 않기 위해서 각 실의 왼쪽 벽의 상단에 위치하며, 급기구는 각 실별로 2개를 배치하였다. 급기구와 배기구의 크기는 각 440 mm × 440 mm, 550 mm × 550 mm이며, 문의 크기는 가로 1.10 m, 세로 2.06 m, 두께 0.1 m로 하였으며 문 틈사이의 Leak area는 0.03 m<sup>2</sup>로 설정하였다. 이 때 슬라이딩 문은 왼쪽에서 오른쪽으로, 힌지 문은 격리실에서 전실 방향으로 개방되도록 설정하였다.

### 2.2 Grid Configuration

유동해석을 위한 격자 구성은 유동해석 공간의 격자를 전체적으로 조밀하게 생성하는 방식과 해석공간의 중요성을 고려하여 공간을 구분하여 격자를 생성하는 방식이 있다. 본 연구에서는 해석공간의 중요성을 고려하여 해석공간을 구분하여 격자의 밀도를 조절하였으며, 총 격자의 수는 2.1×10<sup>6</sup>로 하였다.



[Figure 1] Simulation Modeling

### 2.3 Simulation Method

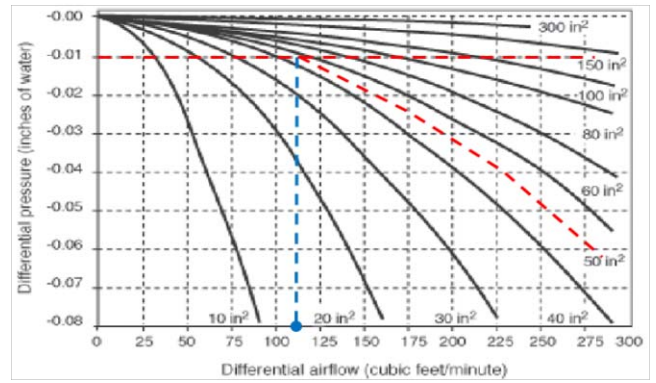
본 연구에서는 해석공간을 정상유동 상태로 해석한 뒤 그 결과를 초기 값으로 설정하여 비정상유동 상태의 해석을 실시하였다. 이 때 정상유동상태 해석의 조건은 100회의 해석 및 수렴조건은 Residual 범위  $10^{-4}$ 로 설정하였으며, 난류 해석모델은  $k-\epsilon$ 을 기준으로 하였다. 비정상유동상태 해석의 조건은 Timestep을 0.0025sec을 기준으로 Timestep 0.0025sec 당 10회의 해석 및 수렴조건은 Residual 범위  $10^{-4}$ 로 설정하였으며 난류 해석모델은 T.Ganesan et al<sup>(11)</sup>의 연구결과를 참조하여 실제 실험적 결과와 일치함을 보여준 LES(Large Eddy Simulation) 난류모델을 적용하였다.

### 2.4 Leak Areas and Differential Pressure Relations

본 연구에서는 음압격리병실의 최소 실간 차압인 2.5 Pa 이상을 유지하기 위해서 Fig. 2에서와 같이 MMWR의 Leakage area와 차압 관계 Data<sup>(12)</sup>를 적용하였다. 이에 따라 Leak areas  $0.03 \text{ m}^2 (45.5 \text{ in}^2)$ 로 실간 차압 2.5 Pa(0.01 inches of water)을 적용하여 틈새 누기량  $0.0623 \text{ kg/s} (110 \text{ ft}^3/\text{min})$ 을 산정하였다.

### 2.5 Boundary Condition

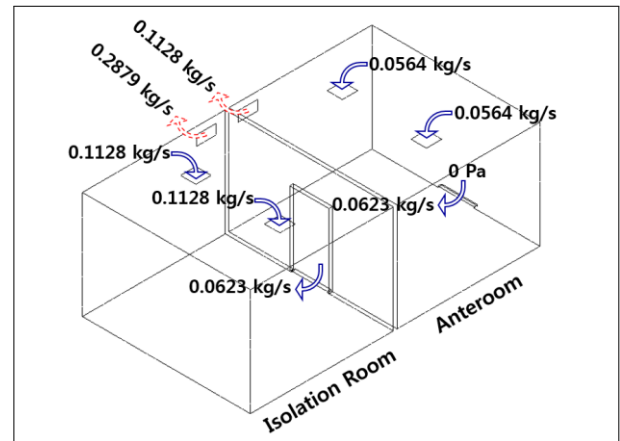
격리실의 환기횟수는 격리실 권장 환기횟수인 12회/h<sup>(8)</sup>로 설정하였으며, 전실의 경우 국가지정압원치료병상 운영관리지침에서 정한 최소 환기횟수인 6 회/h로 설정하였다. 따라서 환기횟수를 기준으로 각 실의 급기량을 선정하였고, 격리실의 배기량은 Fig. 2에서 Leak area와 차압 관계를 통해 구한 Leakage area 누기량인  $0.0623 \text{ kg/s} (110 \text{ ft}^3/\text{min})$ 을 합산하여 선정하였다. 또한 복도와 전실로 연결되어있는 Leak area는 압력의 경계조건을 설정하였다.



[Figure 2] Relation between Pressure Difference and Leak Areas

[Table 1] Boundary Condition

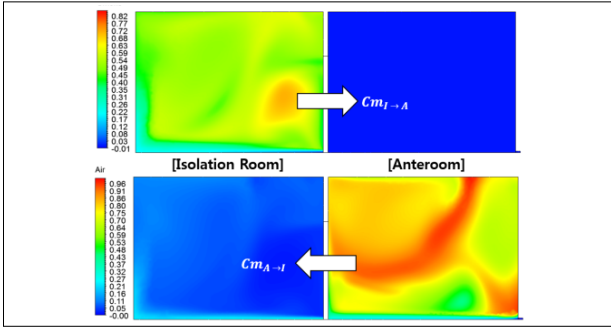
Zone	Location	Condition	Value
Isolation Room	Supply ①	Inlet	0.1128 kg/s
	Supply ②	Inlet	0.1128 kg/s
	Exhaust ①	Outlet	0.2879 kg/s
Anteroom	Supply ③	Inlet	0.0564 kg/s
	Supply ④	Inlet	0.0564 kg/s
	Exhaust ②	Outlet	0.1128 kg/s
	Leak areas	Opening	0 Pa



[Figure 3] Boundary Condition

### 2.6 Air Exchange Calculation Method between Isolation Room and Anteroom

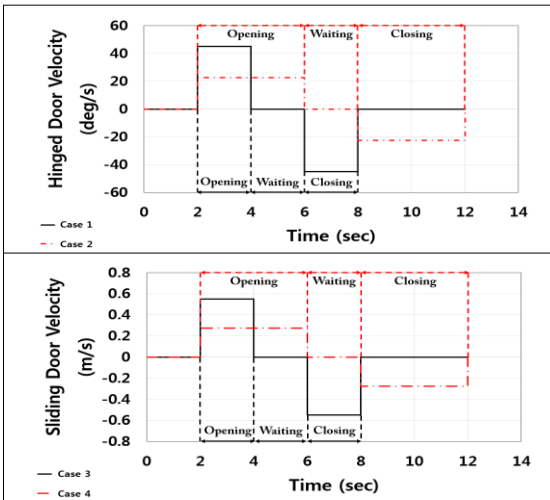
본 연구에서 실간 공기교환량을 산정하기 위해서 Fig. 4와 같이 격리실에 「오염된 공기」라고 가정한 Smoke를 가득 채우고, 전실을 「오염되지 않은 공기」라고 가정한 Air를 가득 채운 상태에서 문의 개폐에 따른 Smoke와 Air의 교환량을 산정하였다. 이 때 격리실에서 전실로 이동하는 Smoke의 양( $m^3$ )을  $Cm_{I \rightarrow A}$ 라고 정의하고, 전실에서 격리실로 이동하는 Air의 양( $m^3$ )을  $Cm_{A \rightarrow I}$ 라고 정의하였다.



[Figure 4] Volume of Smoke and Air between Isolation Room and Anteroom

## 2.7 Simulation Condition

본 연구에서는 슬라이딩 및 힌지 문의 개폐속도에 따른 개폐시간을 동일조건으로 설정하기 위해서 힌지 문의 개폐속도( $D_{hv}$ )를 45 deg/s(Case 1), 22.5 deg/s(Case 2) 그리고 슬라이딩 문의 개폐속도( $D_{sv}$ )를 0.55m/s(Case 3), 0.275m/s(Case 4)로 설정하였다. 또한 Fig. 5에서와 같이 2 sec 동안 문이 완전히 개방된 시간을 포함하여 문이 열리고 닫히는 데 필요한 총 소요시간은 각 6 sec, 10 sec로 설정하였다.



[Figure 5] Door Opening and Closing Velocity

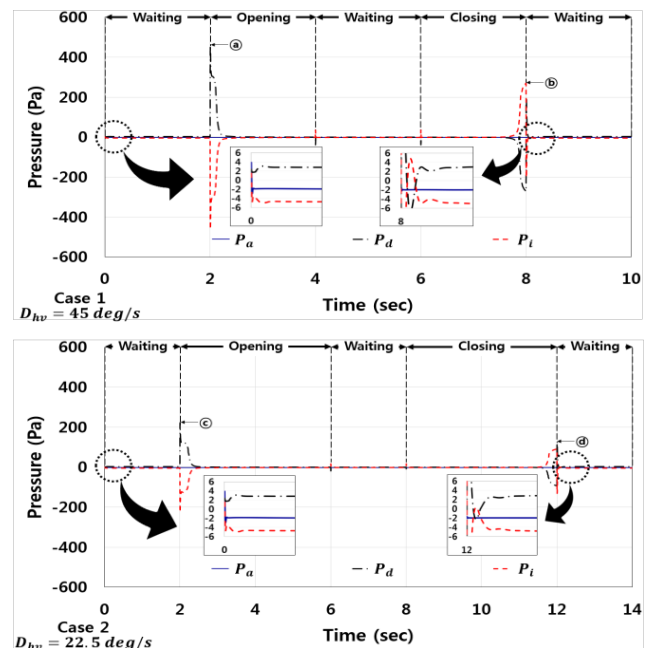
## 3. Simulation Result

### 3.1 Pressure Fluctuation Analysis

[Figure 6]은 전실의 압력을  $P_a$ , 격리실의 압력을  $P_i$ , 격리실과 전실의 차압을  $P_d$ 으로 나타낸 힌지 문의 개폐에 따른 압력변동을 보여주고 있다. 힌지 문의 개폐에 따르는 압력변동을 살펴보면 힌지 문이 열리는 순간  $P_a$ 는 일정 값을 유지하는 반면  $P_i$ 는 순간적으로 감소되는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 문이 열리기 시작하는 순간 ㉠과 ㉡에서  $P_d$ 가 증가하여

격리실과 전실의 최소 압력차인 2.5 Pa보다 커지게 되는 결과를 볼 수 있다. 이는 힌지 문이 개방하는 순간 문의 움직임에 따른 관성력 및 와류에 의해 격리실의 공기유동이 강제적으로 전실로 향함으로써  $P_i$ 가 순간적으로 감소됨으로 판단된다. 이후 문이 개방됨에 따라 격리실과 전실이 평압을 형성한다.

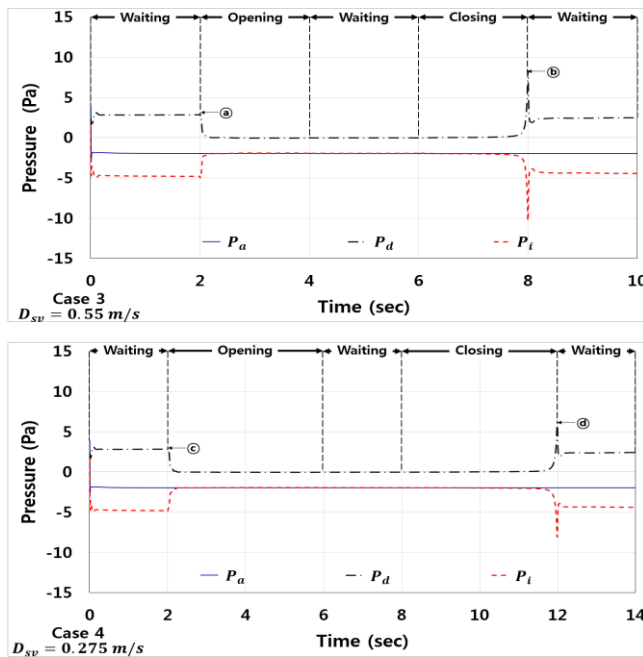
㉠과 ㉡에서 보는바와 같이 힌지 문이 완전히 닫히는 순간의 압력변동은  $P_i$ 가 순간적으로 증가함에 따라 음압격리병실에서 전실의 압력보다 격리실의 압력이 높게 나타나는 압력역전현상을 볼 수 있다. 이는 힌지 문이 전실에서 격리실을 향하여 문이 닫히는 과정에서 문의 움직임에 유도되는 공기유동으로 인해 전실의 공기유동이 강제적으로 격리실로 향함으로써  $P_i$ 가 증가되는 것으로 판단되며, 문이 완전히 닫힌 후에는 설정 차압 2.5 Pa로 회복되는 것을 볼 수 있다. 따라서 힌지 문이 설치된 음압격리병실에서는 문이 닫히는 과정에서 압력역전현상이 나타남에 따라 이를 고려한 표준 운영절차(SOP)수립이 필요할 것으로 생각된다. 힌지 문의 개폐속도( $D_{hv}$ )에 따른 압력변동은 전반적으로 비슷한 압력변동의 경향을 보인다. 하지만 힌지 문의 개폐속도( $D_{hv}$ )가 45 deg/s인 경우 ㉠에서  $P_d$ 가 약 460 Pa까지 상승하며, 22.5 deg/s인 경우에는 ㉡에서  $P_d$ 가 약 220 Pa까지 상승함으로써 힌지 문의 개폐속도( $D_{hv}$ )가 빠를수록 압력변동이 약 2배 상승되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 힌지 문의 개폐속도( $D_{hv}$ )가 빨라질수록 압력변동이 증가됨으로써 음압격리병실에서 실간 압력변동을 줄이기 위해서는 보행자에 의해 힌지 문이 개폐하는 순간 힌지 문의 개폐속도( $D_{hv}$ )를 느리게 만들어 줄 수 있도록 하는 힌지 문의 개폐 완충장치가 중요함을 알 수 있다.



[Figure 6] Pressure Fluctuation w.r.t. Time (Case 1 & Case 2)

[Figure 7]은 슬라이딩 문의 개폐에 따른 압력변동을 보여 주고 있는데 슬라이딩 문의 압력변동은 힌지 문의 압력변동과 달리 문의 열리기 시작하는 순간 ㉠과 ㉡에서 보는바와 같이  $P_d$ 의 큰 변화를 볼 수 없다. 이는 힌지 문의 움직임에 비해 슬라이딩 문의 움직임에 따른 관성력 및 와류의 영향력이 상대적으로 감소됨으로써 큰 압력변동이 나타나지 않는다고 판단된다. 이후 문의 개방됨에 따라 힌지 문의 경우와 동일하게 격리실과 전실이 평압을 형성한다.

슬라이딩 문의 닫히는 순간의 압력변동은 힌지 문에서 발생된 압력역전현상이 나타나지 않으며 오히려 힌지 문의 압력변동과 반대로 Fig. 6의 ㉢와 ㉣에서와 같이  $P_d$ 가 실간 압력차인 2.5 Pa보다 커지는 것을 볼 수 있다. 슬라이딩 문의 경우 힌지 문이 닫히는 과정에서 문의 움직임에 유도되는 공기유동이 발생되지 않는 것을 알 수 있다. 또한 실간 설정차압을 회복하기 위해 문의 완전히 닫히는 매우 짧은 순간에 격리실에서 전실로 문틈 사이를 통해 이동하는 공기로 인하여 짧은 시간에 실간 차압이 2.5 Pa보다 급격하게 상승되는 것으로 판단되며 문의 완전히 닫힌 후에는 설정차압인 2.5 Pa로 회복되는 것을 볼 수 있다.



[Figure 7] Pressure Fluctuation w.r.t. Time (Case 3 & Case 4)

슬라이딩 문의 개폐속도( $D_{sv}$ )에 따른 압력변동은 전체적으로 비슷한 압력변동의 경향을 보인다. 하지만 슬라이딩 문의 개폐속도( $D_{sv}$ )가 0.55 m/s인 경우  $P_d$ 가 최대 약 8 Pa까지 상승하며, 0.275 m/s인 경우에는  $P_d$ 가 약 6 Pa까지 상승함으로써 슬라이딩 문의 개폐속도( $D_{sv}$ )가 증가할수록 압력변동의 폭이 약 1.3배 상승되는 것을 확인할 수 있다. 그러나

슬라이딩 문의 개폐속도( $D_{sv}$ )에 따른 압력변동의 폭은 힌지 문의 개폐속도( $D_{hv}$ )에 따른 압력변동에 비해 매우 미미한 압력변동을 보이며, 힌지 문의 개폐에 따라 나타나는 압력역전 현상이 나타나지 않음에 따라 음압격리병실에서 문을 설치할 경우 힌지 문보다 슬라이딩 문을 설치하는 것이 음압격리병실에서 안정적인 실간 압력차 유지 및 효율적인 봉쇄효과를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2 Air Exchange Analysis

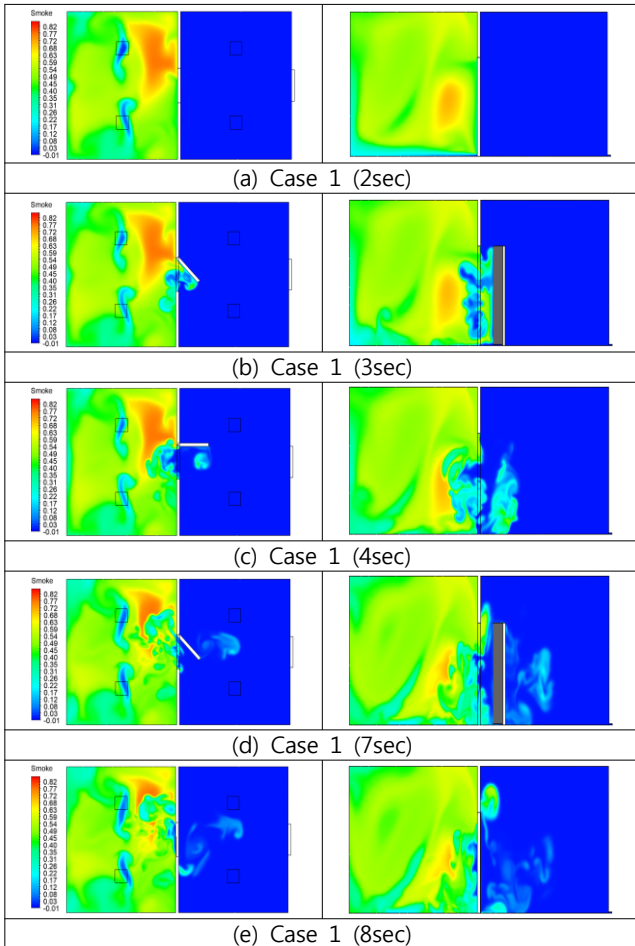
[Figure 8]과 [Figure 9]는 각 힌지 문과 슬라이딩 문의 개폐에 따른 Smoke 농도분포를 나타내고 있다. 힌지 문의 경우 문의 열리면서 문의 움직임에 의한 유동 및 와류의 생성으로 인한 Smoke 농도분포가 격리실에서 전실로 확산되는 것을 시각적으로 확인할 수 있다. 또한 문의 닫히는 과정에서는 문의 상단에서 Smoke 농도분포가 눈에 띄게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 문의 닫히는 과정에서 나타나는 압력역전현상으로 인하여 Smoke의 확산이 일어난다고 판단된다.

슬라이딩 문의 경우 힌지 문의 개폐에 따른 Smoke 농도분포가 확연하게 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 슬라이딩 문이 열리면서 문의 움직임에 의한 유동 및 와류가 감소하며, 슬라이딩 문에서 문의 개폐에 따른 압력역전현상이 나타나지 않기 때문에 Smoke 농도분포가 격리실에서 전실로 확산되는 것이 크게 감소되는 것을 볼 수 있다.

IEames et al.<sup>(13)</sup>의 연구에 따르면 힌지 문의 개폐과정에서 문의 닫힐 때보다 열릴 때에 공기교환량이 더 활발하게 발생한다고 알려져 있다. 위와 같은 선행연구와 본 연구를 비교하기 위해서 힌지 문과 슬라이딩 문의 개폐과정에서 발생하는  $Cm_{A \rightarrow I}$ 와  $Cm_{I \rightarrow A}$ 를 Table. 2에 나타내었다. 본 연구에서 힌지 문은 선행연구와 동일한 조건으로써 문의 열릴 때가 닫힐 때보다  $Cm_{A \rightarrow I}$ 와  $Cm_{I \rightarrow A}$ 가 약 118%, 65% 더 높게 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 선행연구의 결과와 동일하게 힌지 문의 개폐과정 중 문의 열리는 과정에서 격리실의 교차오염이 더 활발하게 발생되며 격리실에서 전실로 확산되는 「오염된 공기」의 양이 증가된다는 것을 알 수 있다.

슬라이딩 문의 경우  $Cm_{A \rightarrow I}$ 는 문의 닫힐 때에 비해 열릴 때에 약 66% 높게 나타나며,  $Cm_{I \rightarrow A}$ 는 문의 열릴 때보다 닫힐 때에 약 10% 증가된 결과를 볼 수 있다. 슬라이딩 문의 경우 힌지 문의 개폐과정에 따른 공기교환량과 상이한 결과를 나타낸다. 즉,  $Cm_{A \rightarrow I}$ 는 슬라이딩 문이 열릴 때,  $Cm_{I \rightarrow A}$ 는 슬라이딩 문이 닫힐 때 공기교환량이 증가한다. 그러나 격리실에서 전실로 확산되는 「오염된 공기」의 관점에서 본다면 슬라이딩 문의 개폐과정에서 문의 닫히는 과정에서 교차오염이 증가된다고 볼 수 있다.

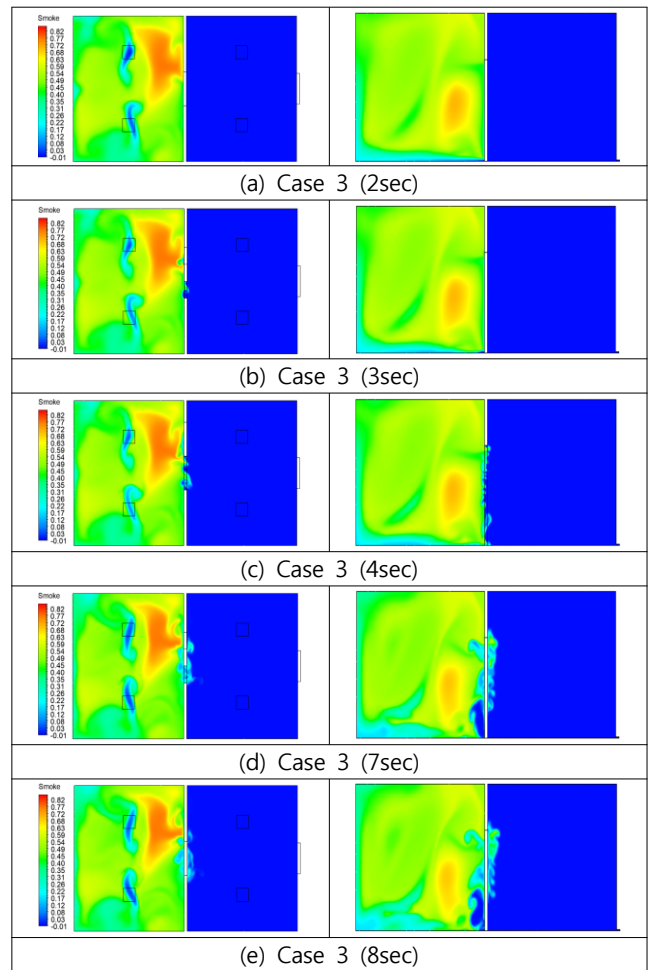
따라서 힌지 문으로 설치된 음압격리병실에서는 문을 여는 과정에서 슬라이딩 문으로 설치된 음압격리병실에서는 문을 닫는 과정에서 발생하는 교차오염의 방지를 위한 시설 및 운영이 중요하며, 이를 고려한 표준운영절차(SOP)수립이 필요할 것으로 생각된다.



[Figure 8] Smoke Concentration Distribution (Case 1)

[Table 2] Air Exchange Volume with Sliding Door and Hinged Door Open and Close

Time [sec]	Case 1		Case 3	
	$Cm_{A \rightarrow I}$ [ $m^3$ ]	$Cm_{I \rightarrow A}$ [ $m^3$ ]	$Cm_{A \rightarrow I}$ [ $m^3$ ]	$Cm_{I \rightarrow A}$ [ $m^3$ ]
Open [2~4]	0.5559	0.2690	0.1195	0.0213
Close [6~8]	0.2543	0.1637	0.0719	0.0235



[Figure 9] Smoke Concentration Distribution (Case 3)

[Table 3]에 각 Case 별 공기교환량을 정리하여 나타내었다. 문의 개폐속도에 따른 공기교환량에 대하여 이미 많은 선행연구<sup>(5-6)</sup>가 있지만 각 연구마다 연구조건이 다르며 그 결과가 일치하지 않다는 점을 고려하여 음압격리병실에서 보다 면밀하고 지속적인 연구의 진행이 필요할 것으로 생각된다. J.I.Choi et al<sup>(14)</sup>의 연구결과에는 문의 종류와 관계없이 문의 개폐속도가 증가할수록 문의 움직임에 따른 와류가 증가하여 실간 공기의 순환과 교환이 활발하게 발생하여 공기교환량이 증가한다고 알려져 있다. 반면 조<sup>(6)</sup>는 슬라이딩 문의 개폐속도가 감소할수록 문의 개방시간이 길어짐에 따라 공기유출량이 증가하는 것을 실험을 통해 밝힌 바 있다. 따라서 본 연구에서는 힌지 문과 슬라이딩 문의 개폐속도에 따른 공기교환량을 비교 분석을 하였다. 힌지 문의 개폐속도( $D_{hv}$ )가 서로 다른 Case 1과 Case 2를 비교하면 힌지 문의 개폐속도( $D_{hv}$ )가 더 빠른 Case 1이 Case 2보다  $Cm_{A \rightarrow I}$ 과  $Cm_{I \rightarrow A}$ 가 약 6.2%, 23.4% 더 높게 나타남으로써 J.I.Choi et al<sup>(11)</sup>의 선행연구와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 힌지 문의 개폐속도( $D_{hv}$ )가 증가함에 따라 와류가 더 크게 발달됨으로써 실간 공기의 순환과 교환이 증가됨을 확인할 수 있

다. 그러나 J.I.Choi et al<sup>(14)</sup>의 선행연구에서는 문의 종류와 상관 없이 문의 개폐속도가 증가할수록 실간 공기교환량이 증가한다고 하고 있으나 슬라이딩 문의 경우 이와 상이한 결과를 나타내고 있다.

슬라이딩 문의 개폐속도( $D_{sv}$ )가 서로 다른 Case 3와 Case 4를 비교하면 슬라이딩 문의 개폐속도( $D_{sv}$ )가 더 느린 Case 4가 Case 3보다  $Cm_{A \rightarrow I}$ 과  $Cm_{I \rightarrow A}$ 가 약 20.5%, 12.1% 높게 나옴으로써 조<sup>(6)</sup>의 선행연구와 유사한 결과를 보여주고 있다. 이는 슬라이딩 문의 움직임에 따른 와류가 힌지 문에 비해 매우 미미하게 생성되며 이에 따르는 실간 공기의 순환과 교환에 영향을 미치지 못한다고 판단되며, 오히려 개폐속도( $D_{sv}$ )가 감소함에 따라 개방시간이 증가하여 실간 공기교환량이 증가된다고 판단된다. 따라서 문의 종류에 따른 문의 개폐속도는 음압격리병실에서 교차오염의 중요한 요인이 될 수 있으며, 최종적으로는 힌지 문의 개폐속도( $D_{hv}$ )는 느릴수록 슬라이딩 문의 개폐속도( $D_{sv}$ )는 빠를수록 격리실과 전실의 공기교환에 따른 교차오염을 감소시킬 수 있다고 판단된다.

2) 힌지 문의 개폐속도가 45 deg/s와 22.5 deg/s인 경우를 비교했을 때 실 간 압력변동의 패턴은 거의 유사하나 힌지 문의 개폐속도가 증가할수록 압력변동은 약 2배 정도 상승되는 것을 확인할 수 있다.

3) 슬라이딩 문의 경우 개방하는 순간에는 힌지 문과 달리 문의 움직임에 따른 관성력의 영향력이 힌지 문에 비해 상대적으로 감소되며, 문의 개방에 따른 와류가 크게 생성되지 않음을 알 수 있다. 따라서, 실 간 압력변동은 커지 않아 문이 개방됨에 따라 실간 압력차이가 서서히 평압으로 유지된다. 또한, 문이 완전히 닫히는 매우 짧은 순간에 격리실에서 전실로 문틈 사이를 통해 이동하는 공기로 인해 실간 차압이 2.5 Pa보다 급상승한 후 설정차압 2.5 Pa로 회복하는 것을 알 수 있다.

4) 슬라이딩 문의 개방속도가 0.55 m/s와 0.275 m/s인 경우를 비교했을 때 실 간 압력변동의 패턴은 거의 유사하나 슬라이딩 문의 개폐속도가 증가할수록 압력변동은 약 1.3배 정도 상승되는 것을 확인할 수 있다.

[Table 3] Air Exchange Volume with Case 1 ~ Case 4

	Type /Velocity[deg/s]	Time[sec]	$Cm_{A \rightarrow I}[m^3]$	$Cm_{I \rightarrow A}[m^3]$
Case 1	Hinged Door /45	6	1.0821	0.5273
Case 2	Hinged Door /22.5	10	1.0190	0.4273
	Type/ Velocity[m/s]	Time[sec]	$Cm_{A \rightarrow I}[m^3]$	$Cm_{I \rightarrow A}[m^3]$
Case 3	Sliding Door /0.55	6	0.3703	0.1017
Case 4	Sliding Door /0.275	10	0.4461	0.1140

#### 4. Conclusion

음압격리병실에서 슬라이딩 문과 힌지 문의 개폐속도에 따른 전실과 음압격리병실에서 발생하는 압력변동 및 공기교환량을 해석적인 방법으로 비교 분석하였으며, 그 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 힌지 문의 경우 문의 개방하는 순간 문의 움직임에 따른 관성력과 와류에 의해 격리실과 전실의 차압이 기준 설정차압 2.5 Pa보다 순간적으로 급격히 증가한 후 평압이 되며, 전실에서 격리실로 문이 닫히는 과정에서는 전실에서 격리실로 향하는 힌지 문의 움직임에 유도되는 공기유동으로 인해 격리실과 전실의 차압이 2.5 Pa보다 순간적으로 급격히 감소하여 격리실의 압력이 순간적으로 증가하는 압력역전현상이 발생되고 문이 완전히 닫힌 후에는 설정차압 2.5 Pa로 회복됨을 알 수 있었다.

5) 힌지 문과 슬라이딩 문의 공기유동 패턴을 비교하면 힌지 문의 경우 문의 움직임에 의한 관성력과 와류의 생성이 슬라이딩 문보다 크기 때문에 힌지 문의 경우 격리실의 압력이 순간적으로 증가하는 압력역전현상이 나타나고 있으나 슬라이딩 문에서 압력역전현상이 나타나지 않고 있다. 따라서 음압격리병실에서의 압력역전현상을 방지하기 위해서 힌지 문보다 슬라이딩 문을 사용하는 것이 격리실에서 전실로 공기이동을 감소시켜 격리실의 봉쇄효과를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

6) 교차오염의 주요 원인을 확인하기 위해 문의 개폐과정에서 발생하는 공기교환량을 분석한 결과 힌지 문이 열릴 때 격리실에서 전실로 유동하는 Smoke의 양과 전실에서 격리실로 유동하는 Air의 양이 문이 닫힐 때보다 더 높게 나타났다. 슬라이딩 문의 경우 전실에서 격리실로 유동하는 Air의 양이 문이 닫힐 때에 비해 문이 열릴 때에 높게 나타난다.

또한, 격리실에서 전실로 유동하는 Smoke의 양이 문이 열릴 때 보다 문이 닫힐 때에 더 높게 나타나고 있다.

7) 힌지 문과 슬라이딩 문의 개폐속도에 따른 공기교환량을 비교한 결과 힌지 문의 경우 문의 개폐속도가 증가할수록 실간 공기교환량이 증가함으로써 개폐속도의 증가에 따른 교차오염의 가능성이 높으며, 슬라이딩 문의 경우 반대로 문의 개폐속도가 감소할수록 실간 공기교환량이 증가함에 따라 개폐속도의 감소에 따른 교차오염의 가능성이 높다는 결과를 알 수 있다. 따라서 음압격리병상 시 설운영시 힌지 문의 경우 개폐속도를 감소시키고 슬라이딩 문의 경우 개폐속도를 증가시킴으로써 격리실과 전실의 공기교환에 따른 교차오염을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 음압격리병실에서 압력변동을 감소시키기 위해서는 문의 종류와 상관없이 문의 개폐속도를 감소시키는 것이 중요하다. 그러나 실간 공기교환량은 힌지 문의 경우 개폐속도를 느리게, 슬라이딩 문의 경우 개폐속도를 빠르게 할수록 교차오염의 가능성을 낮출 수 있다는 것을 알 수 있다. 이에 따라 음압격리병실에 설치된 문의 종류에 따라 효율적인 운영방안 등 향후 실험적인 방법에 의한 추가 연구가 요망된다. 또한, 힌지 문에 비해 슬라이딩 문의 경우 교차오염의 노출이 감소됨에 따라 음압격리병상에서 슬라이딩 문의 설치가 힌지 문에 비해서 더 적절할 것으로 판단된다.

**Acknowledgements:** Funding for this study was provided by Korean Centers for Disease Control & Prevention and Industry Academic Cooperation Foundation of Gachon University

## References

AIA, 2001, The Guideline for Design and Construction of Hospital and Health Care Facilities, 2001 edition, pp. 56.

Victoria, 2007, Guideline for The Classification and Design of Isolation Rooms in Health Care Facilities, Victoria Advisory Committee on Infection Control, pp. 5-6.

질병관리본부, 2016, 2016 메르스 대응지침, 메르스 대응지침(4-1판), pp. 3-5.

J.W.Tang, I.Eames, Y.Li, Y.A.Taha, P.Wilson, G.Bellingan, K.N.Ward, J.Breuer, 2005, Door Opening Motion Can Potentially Lead to a Transient Breakdown in Negative-Pressure Isolation Condition: The Importance of Vorticity and Buoyancy Airflows, Journal of Hospital Infection (2005) 61, 283-286.

P.Kalliomaki, P.Saarinen, J.W.Tang, H.Koskela, 2016, Airflow Patterns through Single Hinged and Sliding Doors in Hospital Isolation Rooms - Effect of Ventilation, Flow Differential and Passage, Building and Environment 107 (2016) 154-168.

조성민, 김기훈, 성민기, CFD 해석을 이용한 출입문 개폐와 인체이동에 따른 음압격리병상에서의 오염물질 유출량 분석, 대한건축학회논문

집 구조계, 33(10), pp.61~68, 2017.10

J.Adams, L.David, Johnson, A.Robert, Lynch, 2011, The Effect of Pressure Differential and Care Provider Movement on Airborne Infectious Isolation Room Containment Effectiveness, Am J Infect Control 2011;39:91-7.

CDC, 2007, Guideline for Isolation Precaution: Preventing Transmission of Infectious Agents in Healthcare Settings.

ANASYS, ANASYS CFX CODE manual ver.16.2.

R.Mittal, G.Iaccarino, 2005, Immersed Boundary Methods, Annu. Rev. Fluid Mech. 2005. 37:239-61.

T.Ganesan, M.Awang, 2015, Large Eddy Simulation (LES) for Steady-State Turbulent Flow Prediction, Springer International Publishing Switzerland 2015.

CDC, 2005, Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium Tuberculosis in Health-care Settings, vol. 54, MMWR.

I.Eames, D.shoib, C.A.Klettner, V.Taban, 2009, Movement of Airborne Contaminants in a Hospital Isolation Room, J. R. Soc. Interface(2009) 6, S757-S766 doi:10.1098.

J.I.Choi, J.R.Edwards, 2011, Large Eddy Simulation of Human Induced Contaminant Transport in Room Compartments, Indoor Air 2012; 22:77-87.

접수 : 2018년 01월 17일  
1차 심사완료 : 2018년 02월 09일  
게재확정일자 : 2018년 02월 09일  
3인 익명 심사 필