https://doi.org/10.15682/jkiha.2018.24.2.37

A Numerical Study on Coughed Particle Dispersion and Deposition in Negative Pressure Isolation Room according to Particle Size

음압격리병실에서의 기침 토출입자의 입경에 따른 확산 및 침적에 대한 수치해석 연구

Jung, Minji* 정민지 | Hong, Jin Kwan** 홍진관

Abstract

Purpose: This study investigates the influences of coughing direction and healthcare worker's location on the transport characteristics of coughed particles in airborne infection isolation room (AIIR), which is commonly called negative pressure isolation room, with a downward ventilation system. **Methods**: Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to simulate the airflow and for tracing the behavior of particles. **Results**: The results show that the airflow pattern and coughing direction have a significant influence on the characteristics of particle dispersion and deposition. When healthcare workers are in the isolation room with the patient who is lying on the bed, it is recommended to be located far from the anteroom to reduce the exposures from infectious particles. And when the patient is lying, it is more effective in removing particles than when the patient is in Fowler's position. Although it is an isolation room that produces unidirectional flow, coughing particles can spread to the whole room and a large number of particles can be deposited onto patient, bed, side rails, healthcare worker, ceiling, floor, and sidewall. **Implications**: Following the patients' discharge or transfer, terminal cleaning of the vacated room, furniture, and all clinical equipment is essential. Also, it is necessary to establish detailed standard operating procedure (SOP) in order to reduce the risk of cross-contamination.

Keywords Coughed particle, Airborne Infection, Computational Fluid Dynamics (CFD), Negative Pressure Isolation Room, Particle Dispersion and Deposition

주 제 어 기침 입자, 공기감염, 전산유체역학, 음압격리병실, 입자 확산 및 침적

1. Introduction

중증급성호흡기증후군(SARS), 결핵, 메르스(MERS), 신종플루(H1N1) 등의 호흡기 질환의 감염환자로부터 나오는 공기 중의 미생물은 먼 거리를 이동하여 감염환자와 접촉하지 않은 사람에게도 전파되어 감염을 유발할 수 있다. 이런 감염성 입자들은 기침, 재채기, 구토, 말하기, 화장실 물 내리기(toilet flush) 등을 통해 토출되고, Airborne이나 Droplet의 형태로 기류를 타고 공기 중을 이동한다. 공기감염은 감염된 사람으로부터 나온 감염 바이러스에 의해 발생되고, 그 바이러스가 공기 중으로 퍼져 피감염자가 흡입하게 되면서 발생한다. 재채기나 기침은 배출속도와 비말되는 양이 크고, 입자농도가 높기 때문에 공기감염의 주된 원인으로 알려져 있다(Duguid, 1946; Gupta et al., 2009: 518). 일반적으로 기침은 많은 호흡기질환의 흔한 증상이기 때문에 본 연구에서는 기침모델을 기본적인 해석모델로 적용하였다.

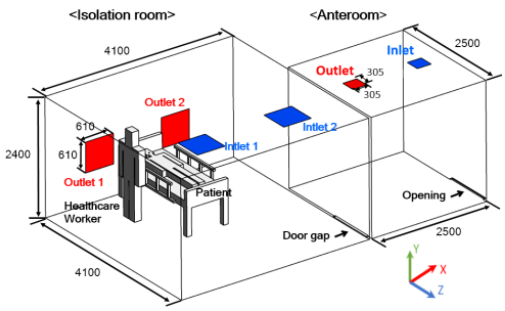
* Graduate School, Department of HVAC & Firefighting Engineering, Gachon University (Primary author: jungminji1117@gmail.com)
** Professor Ph.D, Department of HVAC & Firefighting Engineering, Gachon University (Corresponding author: jkhong@gachon.ac.kr)

Wan et al.(2007)은 배기구의 설치 위치가 입자의 확산패턴에 상당한 영향을 주게 되며, Sze To et al.(2008)은 실내기류와 기침 방향이 토출되는 에어로졸의 이동에 큰 영향을 끼친다고 보고하고 있다. Qian et al.(2008)은 환기횟수 4회를 기준으로 4종류의 하향 환기방식에 대하여 실험과 해석을 수행하였다. 그 결과 하향 환기방식은 환기횟수 4회로는 부상하는 열 기둥으로 인한 공기의 혼합 때문에 일방향의 공기유동이나 층류가 생성되지 않는다고 밝히고 있다. 또한 배기구가 위쪽에 있는 경우 큰 입자보다 작은 입자를 제거하는 데에 더 효율적이고, 배기구가 아래쪽에 있는 경우 큰 입자를 제거하는 데에 더 효과적임을 밝히고 있다. Kwon et al.(2013)은 천장과 측벽의 모서리 부분에서 라인형 디퓨져를 통해 급기되고 천장 중앙부를 통해 배기되는 환기방식, 천장에서 급배기가 이루어지는 환기방식, 그리고 천장 중앙부에서 급기되어 측벽으로 배기되는 환기방식의 입자제거율을 예측하는 해석을 수행하였다. 그 결과 세 번째 천장 중앙부에서 급기되어 측벽으로 배기되는 하향 환기방식이 제일 효과적으로 입자를 제거하는 것으로 보고하였다. 그러나 세 종류의 환기방식에 따른 입자의 거동특성은 크게 구별되지 않았으며, 토출된 비말의 크기에 따른 분포특성은 두드러지게 나타났다고 밝힌 바 있다.

아직 실제적인 병실과 전실로 이루어져 있는 음압병실에서의 입자 분포에 대한 연구가 이루어지지 않고 있다. 측벽배기를 사용하는 하향 환기방식은 공기에 의한 교차 감염의 위험을 방지하고 실에 있는 오염물질을 제거하는 데에 가장 추천되는 환기방식 중 하나이다. 따라서 본 연구는 CFD에 의한 입자 추적방법을 이용하여 측벽배기방식으로 환기가 이루어지는 음압병실에서 환자가 기침한 경우, 기침 토출 입자의 크기에 따른 입자 제거율과 침적률을 파악하였다. 이를 통하여 음압병실의 환기방식에 따른 효율적인 입자 제거방안을 강구하는데 기초자료를 얻고, 감염확산 방지를 위한 음압병실의 환경소독 방안을 제안해 보고자 하였다.

2. Numerical Simulation

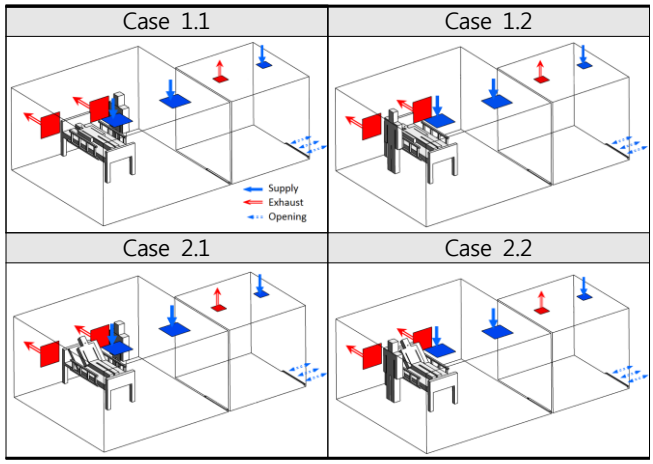
2.1 Model Generation



[Figure 1] Geometry of isolation room and anteroom

국가지정 입원치료병상의 시설기준에 부합하는 실제 병원의 음압격리병실에 대해서 해석모델을 설정하였다. 병실에는 침대와 침대 위에 누워있는 환자, 의료진이 재실하고 있다. 병실과 전실 사이에는 차압 형성을 위한 가로 1,000 mm, 세로 20 mm의 문 간극(door gap)을 설정하였다. 문 간극을 통해 전실의 공기가 음압격리병실 안으로 들어오고 나간다. 해석모델은 병실과 전실로만 구성하였지만 전실과 복도간의 차압을 형성해주기 위해 전실과 외부 사이에 개구부(opening)를 두어 실제 음압병실의 공기유동을 모사할 수 있도록 하였다.

환자가 침대와 수평으로 누워있을 때와 45°로 앉아있을 때로 나누어 해석을 진행하였다. 모든 Case의 병실 급배기 방식은 천장에 설치된 급기구를 통해 공기가 공급되고, 환자와 가까운 벽에 설치된 배기구를 통해 공기가 나가는 측벽 배기방식을 나타내고 있다. Case 1.1과 Case 1.2는 환자가 수평으로 누워있는 경우이고, Case 2.1과 Case 2.2는 환자가 45°로 앉아있는 경우이다. Case 1.1과 Case 2.1은 의료진이 환자 기준 왼쪽에 위치한 경우이고, Case 1.2와 Case 2.2는 오른쪽에 위치한 경우이다.



[Figure 2] Position of the patient and location of the healthcare worker

2.2 Boundary Conditions of Coughing

감염이 에어로졸로 전파되는 감염기전은 비말과 공기에 의한 전파로 구분될 수 있다(Gralton et al., 2010: 2). WHO(2014)는 5 μm를 초과하는 입자는 비말감염, 5 μm 이하의 입자는 공기감염으로 구분하고 있다. 비말감염은 입자의 크기 때문에 토출된 입자가 표면에 빠르게 내려앉게 되는 경향을 보인다. 반대로, 공기감염은 토출되는 입자의 크기가 더 작기 때문에 공기 중에 더 오랫동안 부유할 수 있는 감염의 형태이고, 이때 입자는 공기 흐름을 따라 확산하게 된다(Chao et al., 2009: 122).

기침할 때 입자의 입경분포는 매우 다양한 것으로 알려져 있다. Yang et al.(2007)은 기침했을 때 토출되는 입자의 평균

입경은 0.62~15.9 μm 이고, 평균적인 크기는 8.35 μm 라고 밝히고 있다. 20 μm 보다 큰 입자는 중력의 영향을 더 많이 받아 상대적으로 더 빨리 침적되며(Gold, 1989; Wang et al., 2011: 1994), 0.5 μm와 20 μm 사이의 입자는 더 오랜 시간동안 공기 중에 부유할 수 있다(McCluskey, 1996; Jinliang et al., 2011: 1994). 또한 감염자의 호흡기관에서 생성된 대부분의 감염성입자는 주로 0.5~5.0 μm의 직경을 가진 비말핵(droplet nuclei)으로 발생하며(Owen et al., 1992; Fernstrom et al., 2013: 5), 장시간 Airborne 입자로 남아있게 되어 가장 감염성이 높은 것으로 알려져 있다(Cole et al., 1992; Fernstrom et al., 2013: 5). 다른 연구에서는 10 μm 보다 작은 입자는 하부 호흡기관 깊숙이 침투할 수 있기 때문에 건강에 더 심각한 영향을 미치고, 10 μm 이상의 입자는 상부기도의 표면에 축적될 가능성이 높아 폐의 아랫부분까지 침투하기 어렵다고 결론짓고 있다(Nicas et al., 2005; Fernstrom et al., 2013: 2). 비말감염과 공기감염 전파는 동시에 이루어지기 때문에(Gralton et al., 2010: 1), 본 연구에서는 0.1 μm, 0.5 μm, 5 μm, 10 μm, 20 μm, 총 5 종류의 입경의 입자가 토출되는 것으로 설정하였다. 토출된 입자는 표면장력이 약 0.07056 N/m이고, 밀도가 993 kg/m³인 구형 물입자로 가정하였다.

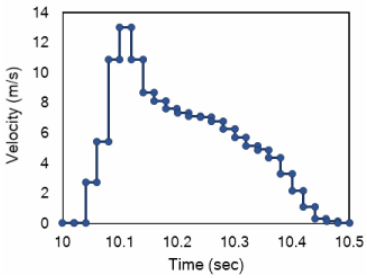
기침 시 토출되는 입자의 개수에 대한 연구는 매우 다양하다. Chao et al.(2009)은 한 번의 기침에서 나오는 입자의 개수는 947~2,085개이고, Fitzgerald et al.(2005)는 약 3,000개의 입자가 발생되는 것으로 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 3,000개의 입자가 입경별로 균일한 분포의 비율로 토출되는 것으로 가정하였으며, 이 경우 입자의 총 토출량은 6.7 mg으로 설정하였다(Zhu et al., 2006: 1694).

Chen and Zhao(2010)의 시뮬레이션 연구결과에 따르면 비말이 비말핵이 되는 입자의 증발은 증발시간이 0.051초, 즉 초기 입경이 100 μm 보다 작으면 증발의 영향은 거의 무시할 수 있다고 밝히고 있다. 따라서 본 연구에서는 증발은 일어나지 않는 것으로 가정하고 해석을 수행하였다.

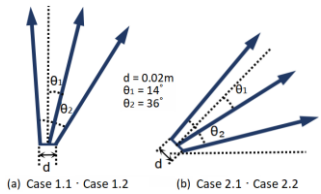
기침은 매우 짧은 시간에 이루어지는 복잡하고 다상인 상태로, 매우 높은 순간속도를 갖는다(Guan et al., 2014: 173). 사람의 성별, 신장, 나이 등에 따라 기침의 속도는 다르고 사람마다 토출각도도 다르며(Kwon et al., 2012: 1262-1264), 기침 시 열려지는 입의 면적도 또한 다르다. Kwon et al.(2012)은 기침의 평균 초기속도는 남자의 경우 15.3 m/s, 여자의 경우 10.6 m/s이고 토출 공기의 각도는 남자의 경우 38°, 여자의 경우 32°라고 밝히고 있다. Gupta et al.(2009)은 기침 시 입의 면적은 남성의 경우 4±0.95 cm², 여성의 경우 3.37±1.4 cm²라고 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 토출구를 2cm의 원형으로 하여 입의 면적을 약 3.14 cm²으로 가정하였다. 기침 지속시간은 0.5초이며, 토출 공기의 온도는 34 ℃로 설정하였다.

또한 [Figure 3]과 같이 토출 공기의 속도분포를 적용하였으며(Gupta et al., 2009: 518), [Figure 4]와 같이 입자의 토출각도를 36°로 가정하여 해석을 수행하였다.

해석모델에는 입자의 브라운 운동이 고려되지 않았으며, 유체는 입자의 거동에 영향을 미치지만 입자는 유체에 영향을 주지 않는 One-way coupling 방법을 사용하였다. 시간에 따른 입자의 이동을 추적할 수 있는 Lagrangian particle tracking을 적용하였다.



[Figure 3] Velocity profile of patient's cough



[Figure 4] Angle of discharged particles

2.3 Boundary Conditions of Isolation Room

CDC 가이드라인에서 환기기준으로 제시하고 있는 음압격리병상의 환기횟수는 12 회/h이고, 음압격리구역 내 실간 차압은 -2.5 Pa 이다(Siegel et al., 2007: 122). 각 실의 급기량은 환기횟수를 고려하여 설정하였다. 이에 부합되는 배기 풍량을 설정함에 따라 각 실의 압력은 전실 -7.52 Pa, 음압격리병실 -10.41 Pa로 차압은 약 -2.89 Pa로 형성되도록 하였다. 재실자나 열 부하에 의해 실내에서 발생될 수 있는 열 기둥 또한 기류패턴에 영향을 줄 수도 있다(Yang et al., 2015: 7-15). 따라서 본 연구에서는 누워있는 환자와 서있는 의료진의 온도를 33 ℃로 설정하였다. 시뮬레이션에 적용된 유량 및 온도조건 등의 경계조건은 [Table 1]에 제시하였다.

해석에 사용된 상용프로그램은 ANSYS CFX (Ver. 18.2)이며, Shear Stress Transport (SST) 난류모델을 적용하였다. SST 모델은 k-ε 모델과 k-ω 모델을 혼합한 것으로서 벽면 부근 유동을 더 잘 모사하며, 해석결과가 격자의 밀도변화에 큰 영향을 받지 않는다고 알려져 있다(Menter et al., 2003: 625).

비정상상태 수치해석을 300초간 진행하였다. Times step은 0.1초로 진행하였으며, 환자가 기침하는 0.5초 동안은 0.02초로 설정하였다. 전체적인 격자는 Tetra를 사용하였으며,

499,064개의 절점(node)과 2,780,182개의 격자(element)로 구성하였다.

음압격리병상 내의 공기유동이 안정되어 정상상태가 되는 10초 시점에 침대 위에서 환자가 0.5초 동안 1회 비말 토출을 하는 것으로 설정하였다. 토출된 입자는 각 배기구로 배기되거나 환자, 침대, 사이드레일, 의료진, 의료진 얼굴 부근, 천장, 바닥, 벽의 표면에 침적되어 제거되는 것으로 하였다. 확산된 입자의 제거 및 침적된 위치와 개수 그리고 실에 부유하고 있는 입자의 개수에 대해 해석하고 이를 분석하였다.

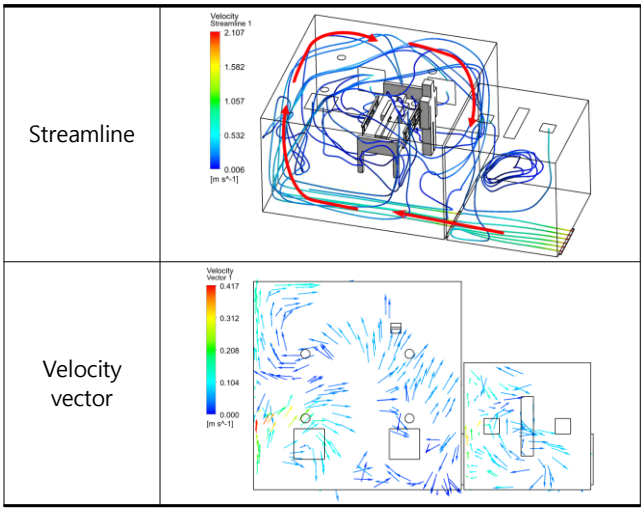
[Table 1] Boundary conditions of CFD simulation

Item			Boundary Conditions
Air Temperature	Indoor		23 ℃
	Air Supply		23 ℃
	Coughed Air		34 ℃
Thermal Conditions	Wall·Ceiling·Floor·Bed		Adiabatic wall
	Patient·Healthcare worker		33 ℃
Coughed Particle	Size		0.1, 0.5, 5, 10, 20 μm
	Total Number Count		3,000 particles
Mass Flow Rate	Isolation Room	Supply Air	0.15936 kg/s
		Exhaust Air	0.20296 kg/s
	Anteroom	Supply Air	0.05925 kg/s
		Exhaust Air	0.0643 kg/s
Pressure	Anteroom	Opening	-5 Pa

3. Simulation Results

3.1 Airflow Patterns in Isolation Room

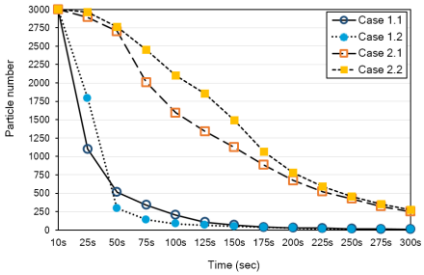
4가지 Case의 기류는 공통적인 특징을 갖고 있다. 병실 급기구에서 나오는 공기는 병실과 전실 사이에 있는 좁은 문 간극을 통해 유입되는 빠른 공기와 함께 벽을 타고 흘러 병실 전체에 퍼지고, 각 배기구로 배기된다.



[Figure 5] Airflow streamline pattern and velocity vector along horizontal plane (ZX) at Y=1.5 m in Case 1.1

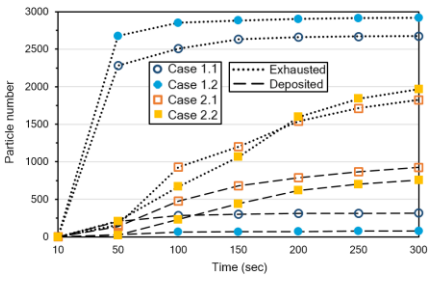
3.2 Dispersion Characteristics of Coughed Particles

[Figure 6]은 시간에 따른 병실에 남아있는 부유입자의 개수를 나타내고 있다. 의료진의 위치와 기침 방향에 따라 입자 저감 효과가 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. Case 1.1은 입자가 토출된 지 15초 이내, 즉 해석시간 25초 시점 이내에 입자 수가 초기 값의 36.7% (1,102개)로 감소되었고, Case 1.2는 59.6% (1,789개)로 감소되었다. 두 가지 Case 모두 50초 이내에 병실에 부유하고 있는 입자 수가 20% 이내로 감소하였고, 300초 시점에 부유하고 있는 입자는 각각 10개와 5개이다. Case 2.1은 실에 부유하고 있는 입자 수가 150초 시점에 초기 값의 37.5% (1,125개), 300초 시점에 8.3% (250개)이다. Case 2.2는 150초에 49.8% (1,494개), 300초 시점에 9.1% (274개)로 나타나고 있다.



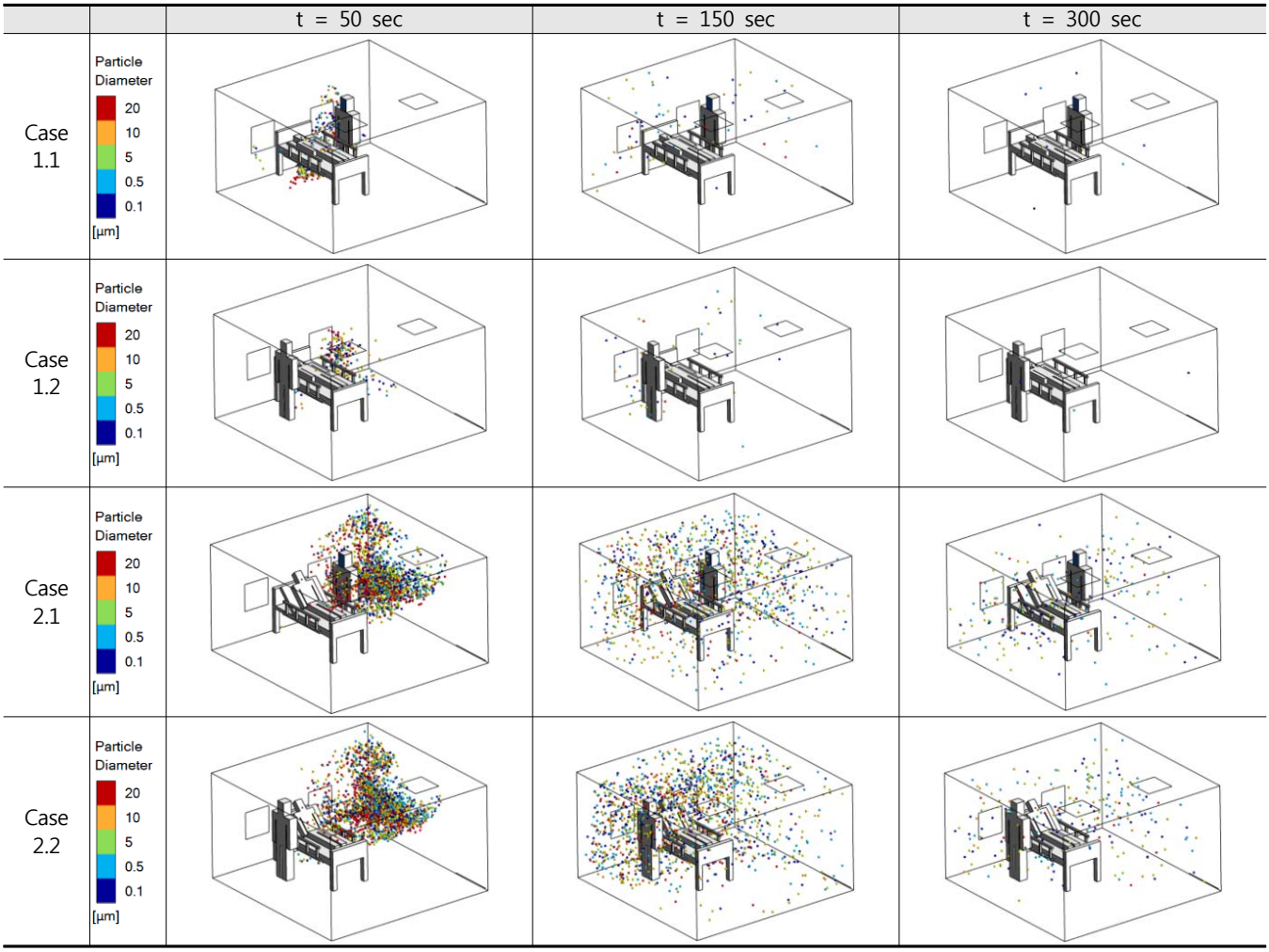
[Figure 6] Particle number decay with time

[Figure 7]은 각 Case별 시간에 따른 배기된 입자의 수와 침적된 입자의 수를 나타내고 있다. 4가지 Case 모두 배기되는 입자가 침적되어 제거되는 입자보다 많은 것으로 나타났다. 또한 배기된 입자가 많을수록 침적된 입자는 적었다. Case 1.2, Case 1.1, Case 2.2, Case 2.1 순으로 배기된 입자의 수가 많았고, Case 2.1, Case 2.2, Case 1.1, Case 1.2 순으로 침적된 입자의 수가 많은 것으로 나타났다. 특히 Case 1.1과 Case 1.2의 경우 입자 토출 후 빠른 시간 안에 많은 양의 입자가 배기되는 것으로 나타났다.



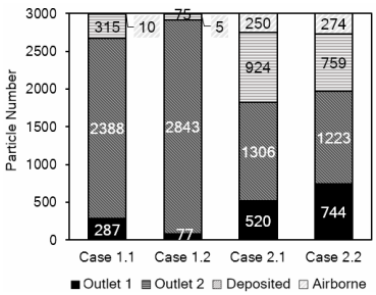
[Figure 7] Number of exhausted particles and deposited particles over time

[Figure 8]은 4가지 Case의 각 시간에 따른 입자의 입경별 확산패턴을 나타내고 있다. 모든 경우 입자는 기류를 타고 병실 전체로 퍼지는 것을 확인할 수 있다. 토출된 0.1 μm, 0.5



[Figure 8] Location of coughed particles according to analysis period

μm, 5 μm, 10 μm, 20 μm의 입자는 시간의 경과에 따라 혼합되는 특성을 보이고 있다. 모든 Case의 경우 토출된 입자는 전실과 가까운 쪽으로 이동한다. 전실 쪽으로 이동한 입자들은 기류에 의해 아래로 하강하고, 그 후 침대 아래나 전실의 문틈 쪽으로 이동하여 반대편으로 이동하고 다시 상승하는 경향을 보인다. 그 이후 시간에 따라 병실 전체로 확산되며, 위의 과정에서 입자는 침적과 배기에 의해 제거된다. 입자 확산 동영상은 아래 웹페이지에서 확인할 수 있다. https://mjjung.modoo.at/?link=8ifahoam

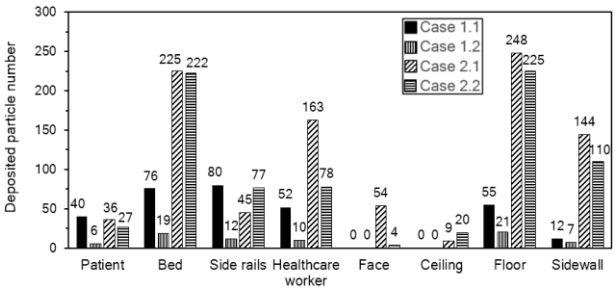


[Figure 9] Number of airborne, exhausted and deposited particles

[Figure 9]는 각 Case별 300초 경과시점에 각 배기구로 배기된 입자, 침적된 입자 그리고 실에 부유하고 있는 입자의 개수를 나타낸 것이다. 의료진이 전실과 가까운 곳에 위치한 Case 중 환자가 누워있는 자세로 기침한 Case 1.1이 환자가 45°로 앉아있는 자세로 기침한 Case 2.1보다 입자제거가 많이 이루어진 것을 알 수 있다. 의료진이 전실과 먼 곳에 위치한 Case 중 Case 1.2 또한 Case 2.2보다 입자 제거가 많이 이루어졌다. 그리고 환자가 누워있는 자세로 기침한 Case 중 의료진이 전실과 먼 곳에 위치한 Case 1.2가 의료진이 전실과 가까운 곳에 위치한 Case 1.1보다 배기된 입자의 수는 많고, 침적된 입자의 수는 적었다. 환자가 45°로 앉아있는 Case 2.2와 Case 2.1의 경우도 같은 경향을 나타냈다.

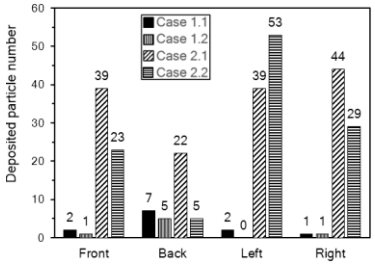
입자의 배기는 배기구(Outlet) 1과 배기구 2에서 이루어진다. 배기구 1은 환자를 기준으로 오른쪽에, 배기구 2는 왼쪽에 위치하고 있다. 4가지 Case 모두 배기구 2에서 배기되는 입자의 수가 배기구 1에서 배기되는 수보다 더 많다. 이것은 [Figure 5]의 Streamline에서 보여주는 바와 같이 공기가 환자를 기준으로 오른쪽에서 왼쪽으로 이동하기 때문에, 입자 토

출 후 초기에 배기구 2쪽으로 이동한 많은 양의 입자가 제거되는 것으로 보인다.



[Figure 10] Number of deposited particles at each location

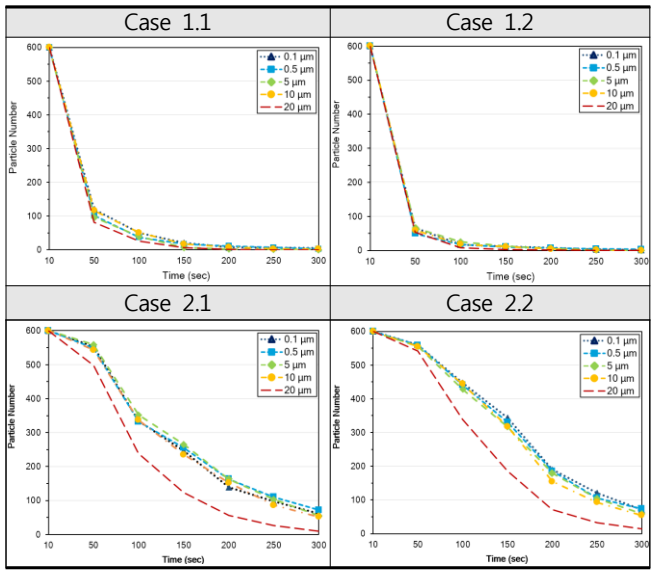
[Figure 10]은 300초의 시간이 경과된 시점에서 침적 위치에 따른 입자의 개수를 보여주고 있다. 토출된 3,000개의 입자는 거의 모든 곳에 침적되었다. Case 1.1의 경우 침대, 사이드레일에 많은 입자가 침적되는 것으로 나타났다. Case 1.2의 경우 전체적으로 적은 침적량을 나타냈다. Case 2.1과 Case 2.2의 경우 침대, 측벽, 의료진에 많이 침적되는 양상을 보이고 있다. 특히 Case 2.1의 경우 의료진 얼굴 부근에 침적되는 입자의 수가 많은 것으로 나타났다. 의료진에게 침적되는 입자의 수를 비교해보면, 환자가 45°로 앉아있을 때 기침한 경우가 누워있을 때 기침한 경우보다 의료진에게 침적되는 입자의 수가 더 많은 것으로 나타났다. 또한 의료진이 전실과 가까운 곳에 위치한 경우인 Case 1.1, Case 2.1과, 의료진이 전실과 먼 곳에 위치한 경우인 Case 1.2, Case 2.2를 각각 비교해보면 의료진이 전실과 먼 곳에 위치한 경우가 의료진에게 침적된 입자의 수가 더 적은 것을 알 수 있다. 이것은 배기구 1에서 배기된 입자가 더 적은 것과 같은 이유로 실내기류가 환자를 기준으로 오른쪽에서 왼쪽으로 이동하기 때문으로 판단된다.



[Figure 11] Number of deposited particles onto wall

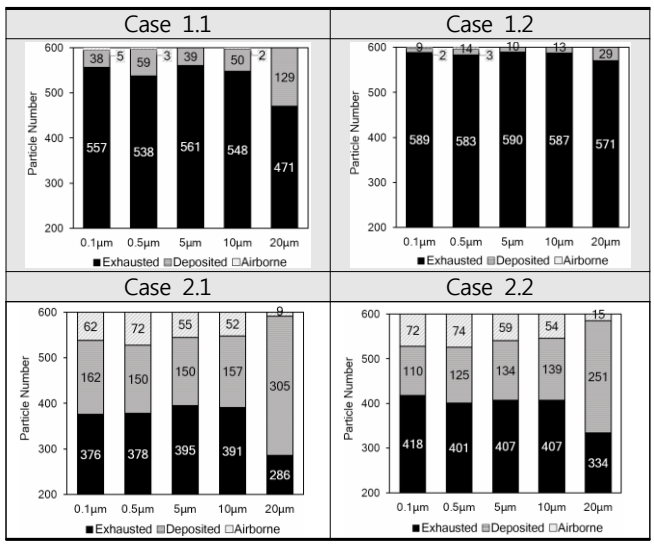
[Figure 11]은 환자를 기준으로 앞 벽, 뒷벽, 좌측 벽, 우측 벽으로 나누어 벽에 침적된 입자의 분포를 나타내고 있다. Case 1.1과 Case 1.2의 경우 전체적으로 적은 측벽 침적량을 나타내고 있으며, Case 2.1과 Case 2.2의 경우 모든 측벽에 입자가 침적되고 있는 것을 알 수 있다.

3.3 Dispersion Characteristics of Coughed Particles according to Particle Size



[Figure 12] Reduction of particle by each size

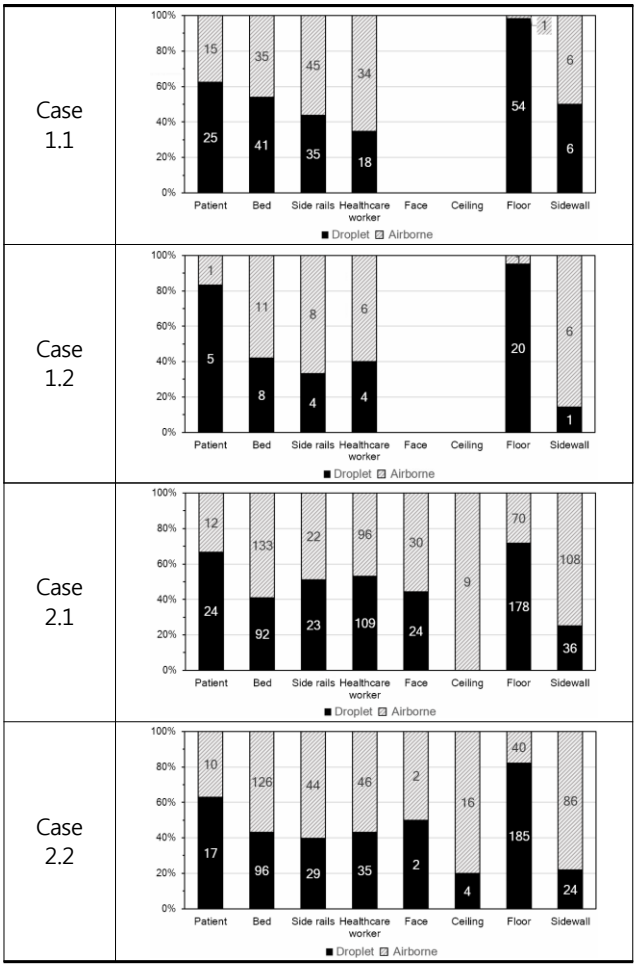
[Figure 12]는 시간에 따른 각 입경별 입자의 개수를 나타낸 것으로 4가지 Case 모두 20 μm의 입자 저감이 가장 빠르게 나타났고, 나머지 입경의 입자들은 비슷한 저감 경향을 보여주고 있다.



[Figure 13] Number of Exhausted, Deposited and Airborne particles according to particle size

[Figure 13]은 입경별 배기된 입자, 침적된 입자, 부유하고 있는 입자의 개수를 나타낸 것이다. 공통적으로 20 μm 입자의 경우 배기되는 양이 가장 적지만 다른 입경에 비해 침적되는 양이 많아 빠르게 제거되었다. 또한 0.1 μm와 0.5 μm 입자가 상대적으로 더 오랫동안 부유하는 것으로 나타났다. Case

1.1과 Case 1.2의 경우 5 μm 입자가 가장 많이 배기되었고 그 다음으로 0.1 μm, 10 μm, 0.5 μm, 20 μm 순으로 배기되었다. 또한 0.5 μm 입자의 침적이 많이 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. Case 2.1과 Case 2.2의 경우 0.5 μm, 0.1 μm, 5 μm, 10 μm, 20 μm 순으로 입자가 실에 많이 남아있는 것을 알 수 있다. 각 Case의 입경별 나타나는 차이는 앞서 설명한 바와 같이 의료진의 위치와 기침 방향이 유동에 영향을 주어 나타나는 현상으로 판단된다.



[Figure 14] Number of deposited particles according to particle size

[Figure 14]는 총 1,800개의 Airborne 입자와 1,200개의 Droplet 입자의 각 위치에 따른 침적된 입자의 비율을 나타내고 있다. 5 μm 이하인 Airborne 입자와 5 μm 보다 큰 Droplet 입자는 입경에 관계없이 거의 모든 곳에 침적될 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 위치에 따른 침적량은 상당히 다른 것을 확인할 수 있다. 또한 의료진의 위치와 기침 방향에 따라서도 입자의 침적 분포가 다른 것을 알 수 있다. 공통적으로 환자와 바닥 등 입자가 하강하는 방향인 곳에 비말 입자의 침적이 많은 것으로 나타나고 있으며, 천장과 측벽 등에 Airborne 입자의 침적이 더 많이 이루어지는 경향을 보여주고 있다. 특히 환자가 45°로 앉아있는 자세이고 의료진이 전실과 가까운 곳에 위치해 있는 Case 2.1의 경우, 의료진의 얼굴 부근에 침적되는 입자들 중 하부 호흡기관에 깊숙이 침투할 수 있는 Airborne 입자들이 많이 포함되는 것으로 나타났다.

4. Conclusion

본 연구는 음압병실에서의 의료진의 위치와 기침 방향에 따른 입자의 확산 특성을 해석하여 효율적인 입자 제거방안을 강구하는데 기초자료를 얻고, 감염확산 방지를 위한 음압병실의 환경소독 방안을 제안해 보고자 하였다. 해석 결과 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 급배기구가 설치된 음압병실의 경우 토출된 입자는 침적되는 것 보다 배기되어 제거되는 양이 더 많다.

2) 감염환자로부터 토출된 감염입자는 초기에 많은 양이 전실과 가까운 쪽으로 이동하므로, 환자를 진료하는 의료진은 전실과 먼 곳에 위치하는 것이 감염입자로부터의 노출을 줄일 수 있을 것으로 예측된다.

3) 환자의 기침 방향에 의해 입자 저감 효과가 크게 달라진다. 측벽배기방식으로 환기가 이루어지는 경우, 환자가 45° 각도로 앉아서 기침하는 경우 보다 누워서 기침하는 경우에 빠른 초기입자 제거가 이루어지는 것으로 나타났다.

4) 일방향의 기류분포를 유도하는 음압병실임에도 불구하고 감염입자는 병실 전체로 확산되어 환자주변과 침대 외에도 의료진, 천장, 바닥, 측벽 등에 많은 양의 입자가 침적될 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 호흡기질환 감염환자가 입원하고 있는 병실에 들어갈 때 각별한 주의가 필요하고, 환자 퇴원 후 입원하고 있던 병실과 가구, 의료 기구들을 모두 소독하는 것이 중요하다. 바닥, 사이드레일을 포함한 침대, 측벽, 천장 순으로 소독을 진행하는 것이 감염확산방지 차원에서 필요함을 알 수 있다.

5) 해석에 사용된 0.1 μm, 0.5 μm, 5 μm, 10 μm, 20 μm 입경의 입자들은 입경에 상관없이 모든 곳으로 확산되어 침적되나, 침적되는 양은 많은 차이를 보였다. 5 μm 이하인 Airborne 입자는 측벽과 천장에 많이 침적되는 양상을 보였고, 5 μm 보다 큰 Droplet 입자는 바닥과 환자에 많이 침적되는 것으로 나타났다.

따라서 감염확산 방지 관점에서 음압격리병실에서의 효율적인 환경소독과 함께 환자 진료 시 의료진의 진료에 대한 표준운영절차(SOP)를 보다 세밀하게 수립해야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgements: This work was supported by Gagyo Tech and Industry-Academic Cooperation Foundation of Gachon University

References

Aaron Fernstrom, Michael Goldblatt, 2013, Aerobiology and Its Role in the Transmission of Infectious Diseases, Journal of Pathogens, Vol. 2013, pp. 1-13.

Caiqing Yang, Xudong Yang, Bin Zhao, 2015, The ventilation needed to control thermal plume and particle dispersion from manikins in a unidirectional ventilated protective isolation room, Building Simulation, Vol. 8, pp. 551-565.

Chao C.Y.H, Wan M.P, Morawska L, Johnson G.R, Ristovski Z.D, Hargreaves M, et al., 2009, Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening, Journal of Aerosol Science 40, pp. 122-133.

C. Chen, B. Zhao,, 2010, Some questions on dispersion of human exhaled droplets in ventilation room: answers from numerical investigation, Indoor Air, Vol. 20, pp. 95-111.

Fitzgerald D, Haas DW. Mycobacterium tuberculosis. In: Mandell GL, Bennett JE, Dolin R, editors., 2005, Principles and practice of infectious diseases. 6th edition. Philadelphia: Churchill Livingstone, pp. 2852-2886.

F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry, 2003, Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, Turbulence Heat and Mass Transfer, Vo. 4, pp. 625-632.

G. N. Sze To, M. P. Wan, C. Y. H. Chao1, F. Wei, S. C. T. Yu, J. K. C. Kwan, 2008, A methodology for estimating airborne virus exposures in indoor environments using the spatial distribution of expiratory aerosols and virus viability characteristics, Indoor Air, Vol. 18, pp. 425-438.

Hua Qian, Yuguo Li, Peter V. Nielsen, Carl E. Hyldgaard, 2008, Dispersion of exhalation pollutants in a two-bed hospital ward with a downward ventilation system, Building and Environment, Vol. 43, pp. 344-354.

Jan Gralton, Euan Tovey, Mary-Louise McLaws, Willian D. Rawlinson, 2010, The role of particle size in aerosolised pathogen transmission: A review, Jounal of infection, Vol. 62, pp. 1-13.

Jinliang Wang, Tin-Tai Chow, 2011, Numerical investigation of influence of human walking on dispersion and deposition of expiratory droplets in airborne infection isolation room, Building and Environment, Vol. 46, pp. 1993-2002.

J. D. Siegel, E. Rhinehart, M. Jackson, L. Chiarello, and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee, 2007, Guideline for Isolation Precautions: Preventing Transmission of Infectious Agents in Healthcare Settings, http://www.cdc.gov/ncidod/dhqp/pdf/isolation2007.pdf.

J. K. Gupta, C.-H. Lin, Q. Chen, 2009, Flow dynamics and characterization of a cough, Indoor Air, Vol. 19, pp. 517-525.

M. P. Wan, C. Y. H. Chao, Y. D. Ng, G. N. Sze To, W. C. Yu, 2007, Dispersion of Expiratory Droplets in a General Hospital Ward with Ceiling Mixing Type Mechanical Ventilation System, Aerosol Science and Technology, Vol. 41, No. 3, pp. 244-258.

Shengwei Zhu, Shinsuke Kato, Jeong-Hoon Yang, 2006, Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment, Building and Environment, Vol. 41, pp. 1691-1702.

Shinhao Yang, Grace W. M. Lee, Cheng-Min Chen, Chih-Cheng Wu, Kuo-Pin Yu, 2007, The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects, Journal of Aerosol Medicine, Vol. 20, pp. 484-494.

Soon-Bark Kwon, Jaehyung Park, Jaeyoun Jang, Youngmin Cho, Duck-Shin Park, Changsoo Kim, Gwi-Nam Bae, Am Jang, 2012, Study on the initial velocity distribution of exhaled air from coughing and speaking, Chemosphere, Vol. 87, pp. 1260-1264.

Soon-Bark Kwon, Ji-Han Song, Young-Min Cho, Woo-Tae Jeong, Duck-Shin Park, 2013, Effect of Ventilation Type on the Trajectory of Coughed Particles hospital Ward, Particle and Aerosol Research, Vol. 9, No. 2, pp. 59-67.

World Health Organization (WHO), 2014, Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory infections in health care: WHO Guidelines.

Yanzheng (Don) Guan, Alamelu Ramesh, Farhad Memarzadeh, 2014, The Effects of Patient Movement on Particles Dispersed by Coughing in an Indoor Environment, Applied Biosafety, Vol. 19, No. 4, pp. 172-183.

접수 : 2018년 04월 13일
1차 심사완료 : 2018년 05월 08일
게재확정일자 : 2018년 05월 08일
3인 익명 심사 필