

# 긴급전환형 임시음압격리병실의 기밀도에 따른 최소 급배기 유량차 평가

Analysis of Minimum Airflow Differences between Supply and Exhaust Air according to Airtightness of Rapidly Converted Temporary Negative Pressure Isolation Rooms

신희원\* Shin, Hee Won | 김동욱\*\* Kim, Dong Wook | 김지민\*\*\* Kim, Ji Min | 정효범\*\*\*\* Jung, Hyo Beom | 강동화\*\*\*\* Kang, Dong Hwa

## Abstract

**Purpose:** During the COVID-19 pandemic, there have been many cases of converting regular hospital wards into temporary negative pressure isolation wards. The purpose of this study is to evaluate the minimum airflow differences that satisfies the pressure difference criteria(-2.5 Pa) according to airtightness of switching type wards, in preparation for utilization of aging regular wards as negative pressure isolation wards. **Methods:** Visual inspection and field measurements were conducted using blower door to evaluate airtightness of 5 hospital wards. CONTAM simulation was used to assess the airflow differences when pressure difference between the corridor and wards met the criteria at various levels of airtightness. **Results:** The ACH<sub>50</sub> of evaluated wards ranged from 19.3 to 50.1 h<sup>-1</sup> with an average of 37.0 h<sup>-1</sup>, indicating more than four times leakier than other building types. The minimum airflow differences increased as the airtightness of the wards decreased and the size of the wards increased. **Implications:** When operating rapidly converted negative pressure isolation wards, understanding airtightness is crucial for determining the minimum airflow differences to maintain the pressure differences. The analysis of this study suggests that improving the airtightness of aging rooms is essential and the minimum airflow differences should be suggested considering both the airtightness and size of rooms.

주제어: 음압격리병실, 이동형 음압기, 최소 급배기 유량차, 기밀도, CONTAM

Keywords: Negative pressure isolation room, Portable negative pressure unit, Minimum airflow differences between supply and exhaust air, Airtightness, CONTAM

## 1. 서론

음압격리병실은 감염성 환자의 격리 공간으로, 의료시설에서 2차 공기감염 예방을 위해 운영되고 있다. 공조시설 및 전실을 활용해 인접 실보다 -2.5 Pa 이상 음압을 형성하고, 병실 내부로 기류를 명확히 유도함으로써 감염체 유출을 방지할 수 있게 된다. 보건복지부의 의료법 시행규칙에 따르면, 음압격리병실은 감염병 유행 확산에 대비해 상급종합병원 및 300병상 이상의 종합병원에 대해 일정 수 설치를 의무화하고 있다. 그러나 감염

병 대유행 기간에는 감염 환자 수 급증에 따른 병상 부족 문제로 추가 확보가 요구되고 있다. 이에 컨테이너, 에어텐트 등 이동식 모듈러의 임시가설건축물로 음압격리병실을 마련할 수 있지만, 설치 비용과 장소 마련 측면에서 적시에 의료현장에 즉각 공급하기 어려운 실정이다.

한편, COVID-19 대유행 기간에는 급속히 증가하는 감염 환자를 수용하기 위해 일반 병동을 일시적으로 폐쇄하고, 일반병실을 음압격리병실로 임시 긴급전환한 사례가 다수 발생하였다. 긴급전환형 임시음압격리병실 역시 음압 형성을 위해 인접 실보다 -2.5 Pa 이상 음압을 유지해야 하며, 일반병실로 재복구하는 것을 고려한다면 고가의 대규모 공조시설 공사가 어려운 한계가 있다. 이에 음압격리병실 마련이 어려운 병원의 경우, 비용이 저렴하고 설치 및 철거가 신속·간편한 HEPA필터

\* 회원, 박사과정, 건축공학과, 서울시립대학교 (주저자: heewon9989@uos.ac.kr)

\*\* 회원, 석사과정, 건축공학과, 서울시립대학교 (wook7734@uos.ac.kr)

\*\*\* 회원, 석사과정, 건축공학과, 서울시립대학교 (jimmin1213@uos.ac.kr)

\*\*\*\* 회원, 석사과정, 건축공학과, 서울시립대학교 (skdy1022@uos.ac.kr)

\*\*\*\*\* 회원, 교수, 건축학부, 서울시립대학교 (교신저자: dhkang@uos.ac.kr)

장착의 간이 공조기(이동형 음압기 등)로 음압격리시설을 임시 운영하고 있다.

일반적으로 국가지정 음압격리병실에서는 급배기를 모두 가동하며, 배기풍량을 급기풍량보다 높게하여 음압을 형성하고 있다. 질병관리본부(2017)는 배기량을 급기량보다 최소 20% 이상으로 명시하고 있으며, 국외에서는 배기량을 급기량보다 약 125 ft<sup>3</sup>/min 이상으로 설정하는 등 급배기 유량 차이에 대한 명확한 기준이 제시되고 있다. 그러나 해당 지침은 국가지정 음압격리병실에서와 같이 1인실의 음압격리병실에 대한 기준으로써, 다인실을 임시음압격리병실로 긴급전환하는 사례를 미루어 보아 다인실 규모의 병실에서 음압유지를 위해 요구되는 급배기 유량차는 이와 상이할 수 있을 것으로 예상되며, 긴급전환형 임시음압격리병실에 대한 최소 급배기 유량차에 대한 지침은 현재 다소 미흡한 실정이다.

[표 1] 국내외 음압격리병실의 기밀성능 관련 기준 현황

발행기관	주요 내용
보건복지부 (2017)	- 음압격리구역 내 모든 벽체, 바닥 천장은 공기의 이동 등 누기가 없도록 하고, 벽체 이음새는 밀폐처리 함 - 음압격리병실 내 모든 창문은 실내 음압유지를 위해 기밀성이 높은 것을 사용하며, 비상시에만 열리도록 함
보건복지부 (2020)	- 음압격리구역 내 모든 벽체, 바닥 천장은 누기가 없도록 하고 벽체 이음새는 밀폐처리 하여야 함 - 음압격리구역 내 모든 창문은 기밀성을 확보하고, 기밀성 창문으로 교체가 어려운 경우, 전환 시 테이프 및 항균실리콘 등을 이용한 밀폐작업을 하여야 함
질병관리청 (2020)	- 벽체를 위층 바닥 슬라브에 밀착하는 등 기밀하게 처리하여야 하며, 접합부 기밀 설계 및 기밀재로 사용하여야 함 - 스위치, 등기구, CCTV, 의료가스 연결구, 콘센트 등을 통한 누기가 발생하지 않도록 기밀하게 설계하여야 함 - 출입문 상부 및 측면 틈새를 통한 누기를 최소화하고, 창문은 기밀 설계하되 화재 등 비상시에만 열리도록 설치함 - 외벽의 창호를 개폐가 가능한 창호로 구성할 경우, 누기가 발생하지 않도록 하여야 함
NHS (2009)	- 밀폐된 견고한 일체형 천장을 설치해야 함 - 외부 창문은 열리지 않도록 하고, 잘 밀폐되어야 함 - 실-복도 사이의 출입문은 올바르게 설치 및 열려야 하며, 닫았을 때는 압력이 유지될 수 있도록 맞춤 되어야 함 - 화장실 문은 올바르게 설치하고 양쪽 여닫이로 하며, 하단부에 'undercut' 혹은 'transfer grille'을 설치해 화장실 내부로 기류를 촉진해야 함 - 병실의 배기가 필요하며, 화장실의 배기량은 격리실의 전체 필요 배기량의 대략 두, 세 배가 되어야 효과적임
CDC (2019)	- 급배기 유량차는 125 ft <sup>3</sup> /min 이상 되도록 하여야 함.
AHIA (2020)	- 급, 배기구의 적절한 구성과 창문, 문의 기밀 시공하여야 함 - 모니터링 통해 공기 누출 감지될 경우, 수리하여야 함 - 급기와 배기의 풍량 차는 125 ft <sup>3</sup> /min을 초과하도록 함 - 실의 기밀화를 위한 누기면적 기준은 약 0.5 ft <sup>2</sup> 으로 함

또한, 음압격리병실의 음압을 위해 필요한 급배기 풍량은 건물의 압력상태, 의료진 출입 등 다양한 요인들에 의해 달라질 수 있다. 특히, 급배기 풍량은 누기와 상관관계가 있어, 동일한 풍량 조건 하에 건축요소를 적정히 밀폐할수록 음압 수준을 더욱 효율적으로 형성·유지할 수 있다. 건축요소의 밀폐는 실간 압력 차에 의한 공기 흐름으로 감염체가 누기를 통해 청정구역으로 침투되는 것을 차단하기 위해서도 중요시되고 있다. 이에 국내외 음압격리병실의 시설기준 및 지침에서는 음압유지를 위해 출입문 언더컷을 확보하고, 일체형 자재 사용 또는 항균성 실리콘의 이음새 처리로 누기를 최소화하도록 권고하고 있다([표 1]).

하지만, 현행 국내 공공 의료기관은 심각한 시설 노후화 문제가 지속 중이며, 국내 기존 음압격리병실에서는 천장 텍스, 전열기구 및 콘센트 등 건축자재의 접촉면에서 누기가 발생하는 경우도 있다([표 2]). 음압격리병실로 임시 긴급전환한 일반병실의 경우 추후 일반병실로의 복구가 필요하고, 건축 현황 및 노후도에 따라 적용 가능한 밀폐 기술이 제한적이거나 완전한 리모델링이 불가할 수 있어 기밀도가 상이할 수 있을 것으로 예상된다. 음압격리병실 시설기준과 마찬가지로 기밀구조 및 재료의 시공이 권장되나, 건축 현황이 고려된 명확한 기밀화 방법 및 수준 지침이 제한된 실정이다. 이에 목표하는 음압 수준의 효과적인 운영을 위해 기밀성능 수준별 급배기 유량차를 평가한다면, 요구되는 긴급전환형 임시음압격리병실의 기밀도 수준 및 간이 공조기의 운영설계 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

[표 2] 음압구역의 누기 여부 조사결과

조사대상	누기 여부 조사결과
'A', 'B', 'C', 'D' 대학병원, 'E' 의료원	- 음압병실 내 벽체 전열 기구(콘센트, 전기패널, 스위치 등)의 누기 발생에 따른 관련 조치가 필요함
'F' 대학병원	- 벽체는 석고보드에 벽지, 천장은 텍스로 마감되어 있어, 클린패널로의 교체가 요구됨 - 외부로 창이 설치되어 있어, 환자가 열고 닫을 수 있으므로 창문의 밀폐처리 조치 필요함 - 음압병실 내 벽체 전열 기구(콘센트, 스위치 등)의 누기 발생에 따른 조치가 필요함 - 음압병실 내부에 통신설비 단자 및 FCU(fan coil unit)가 설치되어 있어, 통신 단자 밀폐처리 및 FCU를 대체할 열원설비 증설이 필요함
'G' 대학병원	- 음압병실 내 벽체 전열 기구(콘센트, 콘솔 등)의 누기 발생에 따른 조치가 필요함 - 병실 화장실 천장의 점검구 설치로 인한 누기 발생이 우려됨(밀폐처리 필요)
'H'대 병원	- 음압병실 내 벽체 전열 기구(콘센트, 콘솔 등)의 누기 발생에 따른 조치가 필요함 - 병실 마감재는 석고보드에 페인트 마감으로 되어있음

이에 본 연구는 긴급전환형 임시음압격리병실의 기밀도 수준에 따라 음압유지 기준(-2.5 Pa 이상)을 만족하는 간이 공조기의 최소 급배기 유량차 평가를 목적으로 한다. 이를 위해 일반병실을 대상으로 현장실험을 수행하여 기밀성능 현황을 조사하였으며, 네트워크 시뮬레이션을 활용해 최소 급배기 유량차를 평가하고자 하였다.

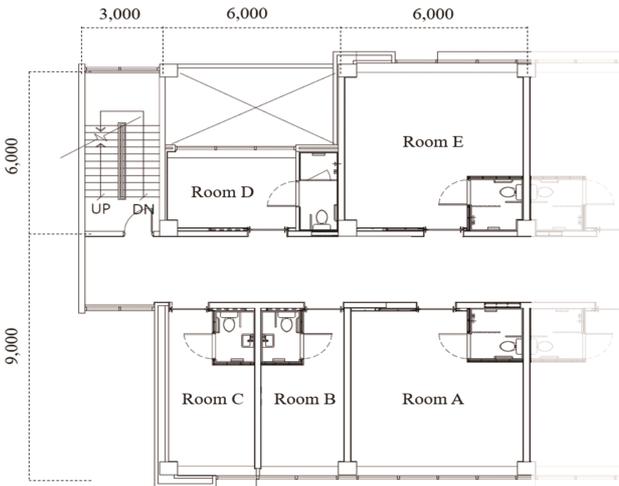
## 2. 연구방법

본 연구에서는 일반병실을 긴급전환형 임시음압격리병실로 활용하는 상황을 가정하였으며, 병실의 기밀도에 따른 최소 급배기 유량차를 평가하기 위해 일반병실을 대상으로 현장실험 및 네트워크 시뮬레이션 평가를 수행하였다. Blower-door 기밀도 평가 실험을 통해 기밀도 현황 평가 및 시뮬레이션 입력변수를 취득하였으며, 평가대상 병실의 기밀도를 기준으로 평가시나리오를 선정해 음압유지(-2.5 Pa 이상)에 요구되는 최소 급배기 유량차를 평가하였다.

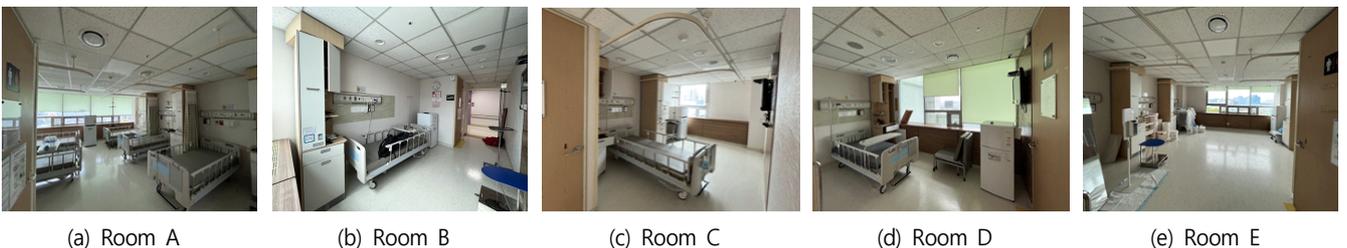
### 2.1 평가대상 선정

현장실험은 COVID-19 대유행 기간 중 이동형 음압기를 설치해 긴급전환형 임시음압격리병실로 운영한 국내 종합병원의 일반병실에서 수행되었다. [그림 1]은 평가대상 병실의 위치를 나타낸다. 현장실험의 소음 및 시설 운영 중 안전을 고려해, 평가대상 병실은 병동 5층의 좌측 끝단 부에 위치한 일반병실 5개소로 선정하였다. 긴급전환 시 병실에는 전실이 권장되지만, 해당 5개소 병실은 복도 전실로 별도 구획되고 있었다. 실험 기간에는 해당 구역에서 환자와 의료진 모두 비재실 중이었다.

각 병실의 바닥면적은 A와 E 병실이 약 32.2 m<sup>2</sup>, B와 C 병실은 약 15.7 m<sup>2</sup>, D 병실이 약 12.9 m<sup>2</sup>이며, 층고는 모두 2.4 m였다. 이때, 평시에는 A와 E 병실은 5인실, C 병실은 2인실, B와 D 병실은 1인실의 일반병실로 운영되었다. 병실의 바닥 및 천장은



[그림 1] 평가대상 병실 평면도



[그림 2] 평가대상 병실 현황

각각 PVC, 텍스 마감이었으며, 벽체는 벽지 마감, 창문은 철제 프레임과 유리패널로 구성되었다. 평가대상 병실은 1997년 병원 준공 이후 2010년에 리모델링 되었으며, 긴급전환형 임시음압격리병실 운영 중 추가적인 건축·설비적 리모델링은 없었다.

시설 전반의 노후 현황을 파악하고 기밀성은 평가대상을 선정하기 위하여, 육안조사를 수행하고 건축요소별 예상 누기 경로를 확인하였다. [그림 3]은 기밀성은 평가대상 요소를 나타내며, 병실 각각에 대해 천장, 창문, 출입문, 스위치 및 콘센트의 일반적으로 밀폐가 강조되고 있는 요소로 선정하였다.



[그림 3] 기밀성은 평가대상 경로

### 2.2 기밀도 현장실험

평가대상 병실 및 평가대상 경로별 기밀도를 평가하기 위해, 블로어도어 가압/감압법(ASTM E779)을 준용해 현장실험을 수행하였다. 블로어도어 가압/감압법은 개구부에 팬을 설치해 실내로 공기를 유입 또는 유출하여 실내외 압력 차를 발생시키며, 목표 압력 차에 도달한 경우의 공기 유량을 바탕으로 기밀도를 평가하는 방법이다. 측정은 블로어도어(Retrotec EU6101 with DM32 Blower-Door System, Retrotec, USA) 장비를 활용하였으며, 실내외 10~50Pa의 압력 차 범위에서 10Pa씩 증가하는 조건에서의 공기 유량을 경로별 가압 및 감압 각 2회씩 반복 측정하였다. 이때, 5개 평가대상 실의 출입문은 모두 동일한 슬라이딩 유형과 규격으로, 'Room A'의 출입문을 대표로 측정하여 모든 출입문의 기밀도는 동일한 것으로 가정하였다. [그림 4]는

본 연구에서 수행된 기밀성능 측정 시의 모습을 나타낸다. 블로어도어는 병실 출입문에 설치하고, 평가대상 요소 이외의 공기 이동 경로(급배기 디퓨저, 냉난방기, 화장실 배수구 등)는 실험 중 계속하여 밀폐하였다.

각 압력 차에서 측정된 공기 유량 결과를 바탕으로 5개소 병실의 공기교환율(Air change per hour at 50Pa, ACH<sub>50</sub>) 및 병실별 5개 평가대상 요소의 유효누기면적(Effective leakage area at 4Pa, ELA)을 산출하였다. 블로어도어를 통하여 취득된 공기 유량 결과를 식 (i)에 대입하여 log-linearized linear regression을 통하여 공기유동계수(Leakage coefficient)와 공기유동지수(Power-law exponent)를 산출하고, 식 (ii)를 통해 경로별 유효누기면적을 산정하였다. 또한, 평가대상 실별 바닥면적이 상이하므로, 단위 바닥면적당 누기면적으로 나타내는 표준누기면적(Normalized leakage area, NL)을 통해 실별 기밀도를 확인하고자 하였다.

$$Q = C(\Delta P)^n \quad \dots\dots (i)$$

$$ELA = C\Delta P_r^{n-1/2} \sqrt{\frac{\rho}{2}} \quad \dots\dots (ii)$$

$$NL = 1000(ELA/A_f)(H/2.5)^{0.3} \quad \dots\dots (iii)$$

여기서,  $Q$ 는 풍량(m<sup>3</sup>/h),  $ELA$ 는 유효누기면적(cm<sup>2</sup>),  $NL$ 은 표준누기면적(-),  $C$ 와  $n$ 은 공기유동계수(m<sup>3</sup>/h·Pa<sup>n</sup>)와 공기유동지수(-),  $\Delta P$ 는 실내외 압력차(Pa),  $P_r$ 는 기준 압력차[4Pa](Pa),  $\rho$ 는 공기밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $A_f$ 는 바닥면적(m<sup>2</sup>),  $H$ 는 층고(m)이다.



[그림 4] Blower-door 설치 및 평가 제외 요소 막음

### 2.3 네트워크 시뮬레이션 평가

일반병실의 긴급전환형 임시음압격리병실로의 전환 시, 음압 유지 기준(-2.5Pa 이상)을 만족하는 기밀성능 수준별 최소 급배기 유량차는 CONTAM을 통해 평가하였다. CONTAM은 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 개발된 네트워크 모델 기반의 멀티존 내 공기 수송을 해석하는 프로그램이다. 인접 존 사이의 기류는 온도 및 압력 차이와 누기면적 입력값을 바탕으로 식 (iv)의 공기 질량보존식을 통해 해석되며, 본 연구에서는 정상상태로 해석되었다.

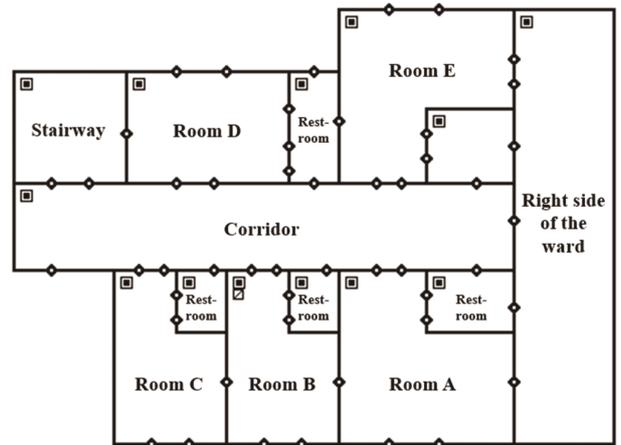
$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = \rho_i \frac{\partial V_i}{\partial t} + V_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \sum_j F_{j \rightarrow i} + F_i \quad \dots\dots (iv)$$

여기서,  $m_i$ 는 존  $i$ 에서 공기의 질량(kg<sub>air</sub>),  $V_i$ 는 존  $i$ 의 실 부피(m<sup>3</sup>),  $\rho_i$ 는 존  $i$ 에서의 공기의 밀도(kg<sub>air</sub>/m<sup>3</sup>),  $F_{j \rightarrow i}$ 는 존  $i$ 와  $j$ 사이의 공기교환율(kg<sub>air</sub>/s)이다.

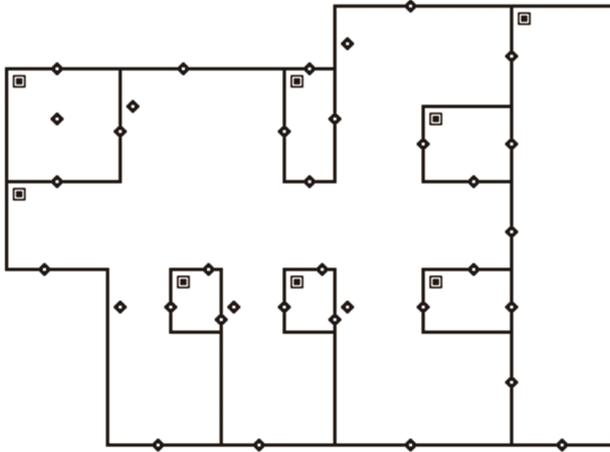
해석대상 공간은 기밀도 측정 현장실험을 수행한 병실의 도면을 참고하여 모델링 하였다. [그림 5]는 모델링 결과를 나타내며, 병실 5개소, 병실 내 화장실, 복도, 계단실 및 병동의 우측 구역을 존(Zone)으로 구현하였다. 각 병실에는 벽체, 천장, 창문, 스위치류 및 콘센트, 출입문을 유동 경로(Airflow path)로 설정하였으며, 단일 흐름 모델(One-way flow)로 공기 유동이 발생하도록 하였다. 이때, [그림 5]의 (b)와 같이 모든 병실과 복도는 공통의 플레넘 공간을 공유하는 현장 상황을 반영하기 위해, 천장의 유동 경로는 평가대상 실의 상층부에 중공층을 모델링하여 설정하였다.

유동 경로별 누기면적(Leakage area data, cm<sup>2</sup>/per item)은 블로어도어 가압/감압법의 현장실험 통해 취득된 유효누기면적 결과를 활용하였다. 벽체와 화장실 문의 유효누기면적은 각 0.5, 4.0cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>로 기밀하고, 화장실 문이 벽체보다는 느슨한 것으로 가정하여 이를 모든 평가대상 병실에 동일하게 적용하였다. CONTAM을 통해 평가하고자 하는 기밀도 시나리오의 경우, 현장 실측값의 기밀도 수준을 검토한 후, 현장 실측값 대비 느슨하고 기밀한 정도를 구분하여 설정하였다.

한편, 일반병실을 긴급 전환할 경우, 음압유지를 위해 간이 공조기(이동형 음압기 등)를 통해 실내를 강제 배기하며, 이를 모사하기 위해 평가대상 병실 내부에 'Return'의 강제 배기구를 모델링 하였다. 간이 공조기의 풍량 설계값은 50~550m<sup>3</sup>/h의 범위에서 50m<sup>3</sup>/h 씩 증량하여, 기밀성능 수준 시나리오별 복도와 평가대상 실간 압력 차를 통해 목표 음압 수준(-△2.5 Pa) 만족 시 요구되는 간이 공조기의 최소 급배기 유량차를 평가하였다. 기밀도에 따른 최소 급배기 유량차를 정량적으로 비교·분석하고자 외부로부터의 영향은 없는 것으로 가정하였으며, 실내 온도는 24°C의 쾌적 조건 및 실외 온도는 간절기의 20°C로 하여 해석을 수행하였다.



(a) 평가대상 병동



(b) 천장 플레넘

[그림 5] CONTAM 해석대상 모델링

### 3. 기밀도 현황조사

[그림 6]은 평가대상 병실 내 건축요소의 기밀도 현황 육안조사 결과를 나타낸다. 벽체와 바닥 마감재 사이는 의료기관 시설 기준을 준수하여 모든 병실에서 걸레받이의 이음새 밀폐처리 되어있었다. 그러나 슬라이딩 유형인 출입문의 경우, 포켓 (pocket)의 누기를 방지하기 위한 웨더스트립이 출입문 상단부와 측면부에 별도 설치되어 있지 않았으며, 창문은 창틀 실리콘 마감의 들뜸 및 웨더스트립의 노후가 확인되었다. 또한, 천장에 대해서는 [그림 6]의 (c)와 같이 텍스 자재의 훼손으로 텍스와 고정 바 사이의 이격이 확인되거나, '(d) 커튼레일 제거 흔', '(e) 스프링클러 설치', '(f) 통신선 연결'의 타공 작업이 수반되는 요소의 설치 및 제거에 따른 텍스 손상이 발생한 것으로 확인된다. 국내 기존 음압병실의 기밀 수준 조사에서도 병실의 노후화로 창문, 천장 텍스 자재, 통신 단자의 누기가 빈번해 해당 요소의 밀폐 필요성이 강조되고 있으며, 특히 평가대상 경로 중 출입문과 천장의 상당한 누기가 예상된다.

블로어도어 가압/감압법을 통한 기밀성능 평가대상 경로별 누기 특성 결과는 [표 3]과 같으며, Specific ELA는 유효누기면적(ELA)을 평가대상 경로의 면적으로 표준화한 값이다. ASTM E779에 따르면 공기유동지수(n)가 0.5 미만 또는 1 초과일 때 비정상적인 결과로 판단하여 재측정을 권고하고 있으나, 본 연구에서 수행한 현장 측정은 n 값이 0.62~0.76의 범위 내에 있는 것으로 보아 모두 유효한 것으로 판단된다.

[표 3] 평가대상 병실의 누기 특성 정보

평가대상 병실	C (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ·Pa <sup>-n</sup> )	n (-)	NL (-)	ACH <sub>50</sub> (h <sup>-1</sup> )	ELA (cm <sup>2</sup> )					Specific ELA (cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )				
					전체	출입문	천장	창문	스위치 및 콘센트	전체	출입문	천장	창문	스위치 및 콘센트
Room A	158.0	0.73	2.40	36.4	799.9	319.1	448.2	32.6	0.0	129.1	115.2	11.4	2.5	0.0
Room B	95.2	0.76	3.90	50.1	620.5		280.3	21.1	0.0	127.2		8.8	3.2	0.0
Room C	104.6	0.70	3.80	43.5	604.7		281.8	3.8	0.0	127.3		11.9	0.2	0.0
Room D	51.1	0.62	3.49	19.3	456.2		125.2	10.1	1.8	168.5		3.5	6.6	43.2
Room E	175.5	0.70	2.55	35.5	831.1		475.0	35.8	1.2	161.1		16.1	1.5	28.8



[그림 6] 기밀성능 현황 육안조사

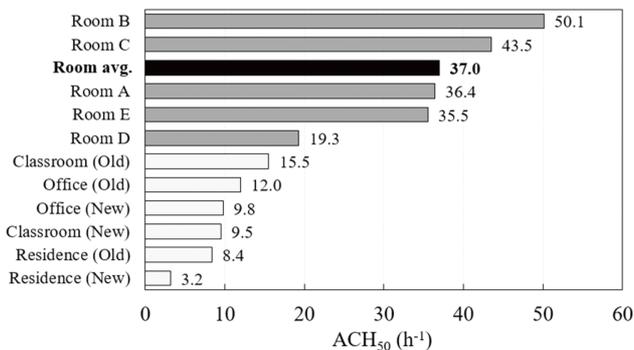
표준누기면적(NL) 결과에 따르면, Room A와 E가 바닥면적이 약 32.2m<sup>2</sup>인 5인실로써 평가대상 실 중에서는 규모가 크나, 기밀도는 1인실, 2인실로 사용되는 Room B, C(약 15.7m<sup>2</sup>), Room D(약 12.9m<sup>2</sup>)보다는 1.5배 낮은 것으로 나타났다.

전체 유효누기면적은 456.2~831.1cm<sup>2</sup>의 범위에서 평균 658.9cm<sup>2</sup>인 것으로 나타났다. 특히, 천장의 경우 전체 유효누기면적 중 46.5%로 높은 비율을 차지하고 있었다. 천장은 앞선 육안조사로 상당한 누기를 예상하였으며, 육안으로 확인한 텍스 자재간 틈새 및 훼손뿐만 아니라 고정 바 형태에서 기인한 공기 누출이 발생한 것으로 판단된다. 이러한 바 형태의 천장은 공기 누출로 실과 인접실의 압력조절에 악영향을 미칠 수 있음에 따라 음압격리병실에서 지양되고 있으며, 임시음압격리병실로 긴급전환할 경우 천장의 기밀이 우선적으로 확보되어야 할 것으로 사료된다.

또한, 출입문은 전체 유효누기면적 중 50.5%로 천장보다 높은 비중을 차지하고 있으며, Specific ELA 결과에서도 가장 높게 나타났다. 이는 병실 출입문 하단의 언더컷 확보와 슬라이딩 도어 포켓(pocket)의 측면부를 통한 공기 누출로 판단되며, 포켓으로부터의 공기 누출을 방지하기 위해 적절한 웨더스트랩의 시공이 필요할 것으로 사료된다. 창문의 경우, 유효누기면적은 전체 유효누기면적 중 2.9%의 비율을 가지며, 스위치 및 콘센트는 0.1%로 가장 낮게 나타났다. 스위치 및 콘센트의 경우, 'Room A', 'Room B', 'Room C'의 3개 병실에서는 누기가 검출되지 않았으나, Specific ELA 결과에 따르면 'Room D', 'Room E'의 일부 병실에서는 단위면적당 천장보다 높은 누기가 발생할 수도 있는 것으로 확인된다.

한편, 평가대상 병실의 기밀도 수준을 파악하기 위해, 50Pa의 압력 차 조건에서 누기에 의한 시간당 환기회수를 나타내는 ACH<sub>50</sub>의 결과를 확인하였다. ACH<sub>50</sub>은 19.3~50.1 h<sup>-1</sup> 범위에서 평균 37.0 h<sup>-1</sup>인 것으로 나타났다. [그림 7]은 평가대상 병실의 공기교환률 수준의 이해를 위하여 다른 건물 유형(주택, 오피스, 교실)의 기밀도와 비교한 결과이다. 이때, 다른 건물 유형의 ACH<sub>50</sub> 결과는 주택 69건, 오피스 15건, 교실 22건을 선행 연구로부터 수집해 2015년을 기준으로 구축과 신축을 구분하여 나타내었다.

보통 다른 건물 유형에서 ACH<sub>50</sub>은 신축일 때 약 10.0 h<sup>-1</sup> 이하, 노후한 건물이라도 약 16.0 h<sup>-1</sup> 이하의 값들이 주로 보고되고 있다. 평가대상 병실 중 'Room D'는 가장 낮은 ACH<sub>50</sub> 결과를 보였음에도 불구하고, 다른 건물 유형의 평균 결과와 비교해 2배 이상의 매우 높은 시간당 환기회수를 보인다. 또한, 평가대상 병실 전체의 평균과 비교해본다면 ACH<sub>50</sub>은 다른 건물 유형보다 약 4배 이상의 느슨한 수준인 것으로 판단된다. 평가대상 병실의 낮은 기밀성능 수준을 미루어보아, '3. 기밀도 현황조사'에서 육안으로 확인했던 병실 내 노후된 자재 현황이 실제 병실의 기밀성능 수준에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 긴급전환형 임시음압격리병실로 운영 시 음압유지를 위해서는 특히 노후한 병실에 대해 기밀도 개선 조치가 필수적일 것으로 사료된다.



[그림 7] 다른 건물유형과 평가대상 병실의 기밀성능 비교

#### 4. 최소 급배기 유량차 평가

현황조사 결과, 평가대상 병실의 기밀도는 다른 건물유형과 비교해 상대적으로 낮은 수준인 것으로 평가되었다. 하지만 이는 사례결과의 하나일 뿐으로 기존 병실의 기밀도는 이와는 차이가 있을 수 있다. 이에 본 연구에서는 평가대상 병실의 기밀도를 기준으로 하여 기밀도가 높고 낮은 경우를 평가시나리오에 반영하여 음압유지를 위한 최소 급배기 유량차를 평가하고자 하였다. [표 4]는 CONTAM 시뮬레이션 평가시나리오를 나타내며, 평가대상 병실의 유효누기면적 실측값(100%)을 기준으로, '매우 느슨(120%)', '다소 느슨(80%)', '다소 기밀(60%)', '기밀(40%)', '매우 기밀(20%)'의 6개 기밀도 case로 구분하였다.

벽체, 천장, 창문, 스위치 및 콘센트, 출입문의 병실별 5가지 유동 경로의 누기면적 시뮬레이션 입력값은 현장실험으로 취득

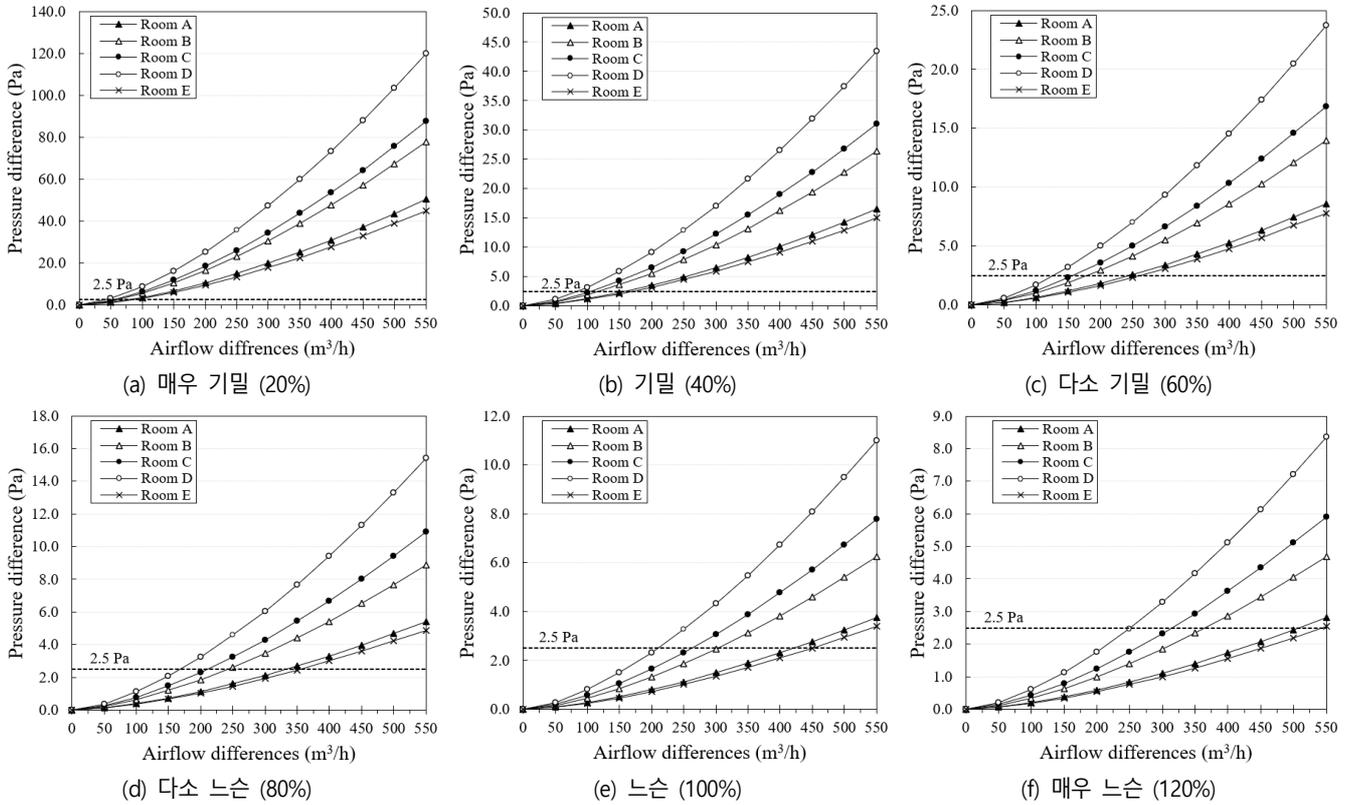
한 유효누기면적 데이터를 활용하였으며, 각 기밀성능 수준 단계에 상응하는 비율로 조정하여 입력하였다. 또한, 간이 공조기의 풍량 설계값은 50~550m<sup>3</sup>/h의 범위에서 50m<sup>3</sup>/h 씩 증량하였으며, 복도와 평가대상 실간 압력 차를 바탕으로 목표 음압 수준 만족 시 요구되는 최소 급배기 유량차를 평가하였다. 최소 급배기 유량차는 50~550m<sup>3</sup>/h의 범위로 평가된 간이 공조기의 배기량에 따른 복도와 평가실 간의 압력 차 결과를 선형회귀하여, 압력 차 2.5 Pa일 때의 풍량 결과를 바탕으로 산출되었다.

[표 4] CONTAM 시뮬레이션 평가시나리오

Case	기밀도 (현장 실측값 기준 대비)	유동 경로	간이 공조기 배기량 (m <sup>3</sup> /h)
1	매우 느슨 (120%)	벽체, 천장 창문, 스위치 및 콘센트, 출입문,	50~550 (50m <sup>3</sup> /h 단위로 증량하여 평가)
2	느슨 (100%)		
3	다소 느슨 (80%)		
4	다소 기밀 (60%)		
5	기밀 (40%)		
6	매우 기밀 (20%)		

[표 5] 기밀도 수준별 최소 급배기 유량차 결과

Case	기밀도 수준 (현장 실측값 기준 대비)	평가대상 병실	최소 급배기 유량차 (m <sup>3</sup> /h)
1	매우 느슨 (120%)	Room A	510.0
		Room B	373.6
		Room C	316.5
		Room D	244.0
		Room E	534.5
2	느슨 (100%)	Room A	432.0
		Room B	303.9
		Room C	257.0
		Room D	197.3
		Room E	459.9
3	다소 느슨 (80%)	Room A	337.9
		Room B	232.8
		Room C	198.3
		Room D	152.9
		Room E	363.1
4	다소 기밀 (60%)	Room A	238.3
		Room B	164.5
		Room C	142.8
		Room D	111.8
		Room E	257.2
5	기밀 (40%)	Room A	144.6
		Room B	103.8
		Room C	93.2
		Room D	75.9
		Room E	156.0
6	매우 기밀 (20%)	Room A	69.7
		Room B	56.2
		Room C	53.4
		Room D	47.3
		Room E	74.2



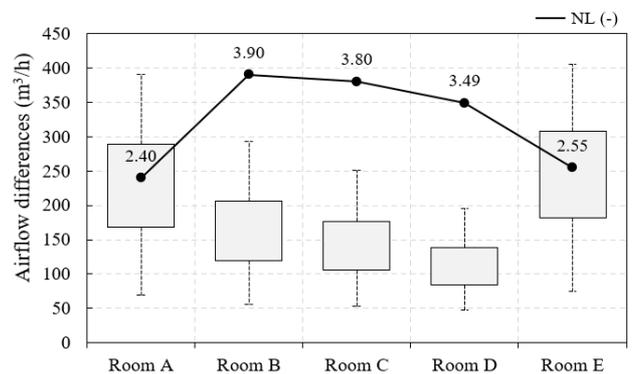
[그림 8] 기밀도 및 배기 풍량에 따른 압력 차 (복도-평가대상 실)

[표 5]와 [그림 8]은 병실의 기밀도에 따른 최소 급배기 유량 차 결과를 나타낸다. 최소 급배기 유량차는 '매우 느슨(120%)'한 경우, 244.0~534.5m<sup>3</sup>/h의 범위로 나타났으며, '느슨(100%)'일 때 197.3~459.9m<sup>3</sup>/h, '다소 느슨(80%)'일 때 152.9~363.1 m<sup>3</sup>/h, '다소 기밀(60%)'일 때 111.8~257.2m<sup>3</sup>/h, '기밀(40%)'일 때 75.9~156.0m<sup>3</sup>/h, '매우 기밀(20%)'일 때 47.3~74.2m<sup>3</sup>/h로 나타났다. 질병관리본부(2013)는 음압유지를 위해 배기량을 급기량보다 최소 20% 이상으로 권고하고 있으나, 기존 노후 병실을 긴급전환하는 경우 병실의 기밀도에 따라 요구되는 급배기 유량차이가 상이해질 수 있는 것으로 판단된다. [그림 8]에서, '매우 기밀'한 경우의 그래프 증가 기울기는 '매우 느슨'한 경우와 비교해 약 14배 높은 수준이었으며, 평가대상 병실 전반적으로 기밀도가 높아짐에 따라 최소 급배기 유량차는 낮아지고 있어, 병실의 기밀도 수준이 음압유지 효과에 주요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

한편, Room C(2인실, 15.7 m<sup>2</sup>), D(1인실, 12.9 m<sup>2</sup>)의 두 병실은 바닥면적이 유사하였고, '매우 느슨'한 기밀도 수준에서도 기존에 음압격리병실 최소 급배기 유량차 권장치로 제시되었던 150~200 ft<sup>3</sup>/min 범위 내를 만족하는 것으로 나타났다(Herrick, 2017). 1인 병실과 같이 소규모 병실을 임시음압격리병실로 긴급전환할 경우, 기밀도가 일정수준 확보된다면 최소 급배기 유량차는 기준범위 내에서 용이하게 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 평가대상 병실 중 현장 기밀도가 가장 낮았던 Room B(1인실)는 Room C와 동일한 바닥면적에도 불구하고, '매우 느슨'한 수준일 경우에 최소 급배기 유량차 권장치인

150~200 ft<sup>3</sup>/min를 상회하는 유량차(373.6 m<sup>3</sup>/h)가 필요한 것으로 나타났다.

[그림 9]는 기밀성능 수준(20~120%)에 따른 최소 급배기 유량차와 표준누기면적 비교를 나타낸다. 특히, Room B, C, D 결과에서, 유사한 병실 규모라도 기밀도가 낮음에 따라 요구되는 최소 급배기 유량차는 높아짐을 보였다. 이러한 결과로 미루어 보아 임시음압격리병실로의 긴급전환 시, 급배기량 설계에 앞서 병실의 기밀도 파악이 선행되어야 할 것으로 사료되며, 유사한 규모의 병실 간 최소 급배기 유량차의 성능 차이를 줄이고 음압유지 효과를 유사한 수준으로 확보하기 위해서는 병실 기밀화 확보가 중요할 것으로 판단된다.



[그림 9] 평가대상 병실의 기밀도(20~120%)에 따른 최소 급배기 유량차 및 표준누기면적 비교

한편, Room A, E(5인실)의 다인실의 최소 급배기 유량차 산정결과, '다소 기밀', '기밀', '매우 기밀'한 수준에서는 최소 급배기 유량차 권장치를 만족하고 있으나, '다소 느슨', '느슨', '매우 느슨'과 같이 낮은 기밀도 수준에서는 급배기 유량차 권장치 최대 값(200 ft<sup>3</sup>/min)보다 1.06~1.57배 높은 유량차가 필요한 것으로 나타났다. [그림 9]에서와 같이, Room A, E(5인실)의 경우 표준누기면적은 각 2.40, 2.55로 평가대상 병실 중 상대적으로 낮은 수준이었으나, 요구되는 최소 급배기 유량차는 표준누기면적이 3.00 이상인 Room B(1인실), C(2인실), D(1인실)보다 평균 1.67배 높게 요구되는 것으로 나타났다. 국가지정 음압격리 병실은 1인실 설치를 원칙으로 하고 있으나, 감염병 대유행 기간에는 긴급치료병상 등 다인 병실을 음압격리병실로 임시 전환하여 운영할 수도 있다. 이에 음압유지를 위해 요구되는 최소 급배기 유량차는 병실의 기밀도 뿐만 아닌 병실의 규모에 따라 권장기준이 제시될 필요가 있다.

## 5. 결론

본 연구는 최근 국내에서 긴급전환형 임시음압격리병실의 마련이 증가하고 있는 시점에 맞추어 기밀도 수준 및 간이 공조기의 운영설계 기초자료로 제공하고자, 병실의 기밀도에 따라 음압유지 기준(-2.5 Pa 이상)을 만족하는 최소 급배기 유량차 평가를 목적으로 수행되었다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 육안조사를 통해 평가대상 일반병실에서 출입문 웨더스트립 미설치, 천장 텍스 자재의 훼손이 주로 확인되었으며, 병실의 전체 유효누기면적 측정 결과는 456.2~831.1 cm<sup>2</sup> 범위에서 평균 658.9 cm<sup>2</sup>로 천장, 출입문, 창문, 스위치 및 콘센트 순으로 높게 나타났으며, 천장과 출입문의 기밀 확보가 특히 필요할 것으로 판단된다.

2) 평가대상 일반병실의 ACH<sub>50</sub>은 19.3~50.1 h<sup>-1</sup> 범위에서 평균 37.0 h<sup>-1</sup>으로, 다른 건물 유형과 비교해 약 4배 이상의 느슨한 수준임을 확인하였다. 육안으로 확인한 노후 현상이 실제 병실의 기밀도에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 긴급전환형 임시음압격리병실로 운영 시 음압유지를 위해서는 특히 노후한 병실에 대한 기밀도 개선 조치가 필수적일 것으로 사료된다.

3) 평가대상 일반병실 모두 기밀도가 높아짐에 따라 최소 급배기 유량차는 낮아지는 것으로 나타나, 병실의 기밀도 수준이 음압유지 효과에 주요한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히, 동일한 1인실 규모라도 기밀도가 좋지 못한 경우에는 최소 급배기 유량차 기준 범위 외일 수 있으므로, 병실의 기밀도 파악이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

4) 평가대상 일반병실 중 5인실의 기밀도는 1인실보다 상대적으로 높았으나, 요구되는 최소 급배기 유량차는 1인실보다 높은 것으로 나타났다. 특히, 낮은 기밀도 수준일 때 최소 급배기 유량차 기준 범위의 최댓값을 초과하였으며, 다인 병실을 음

압격리병실로 임시 마련할 경우, 최소 급배기 유량차는 병실의 기밀도와 함께 병실의 규모에 따라 다르게 고려되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 긴급전환형 임시음압격리병실에서 요구되는 기밀도 수준 및 간이 공조기의 운영설계 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 평가된 최소 급배기 유량차는 평가대상 병실을 기준으로 조정된 기밀도 수준으로, 간절기에 대해서만 평가하였다. 평가대상 일반병실과 다른 수준의 기밀도를 갖는 병실들도 상당수 있을 수 있으며, 계절 조건 역시 주요한 영향 요인으로 작용할 수 있으므로 더욱 명확한 결론을 도출하기 위해, 향후 연구에서는 병실의 다양한 기밀데이터 수집과 실제 현장에서의 검증, 다양한 실내외 온도조건이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

사사: 본 연구는 보건복지부의 재원으로 감염병의료안전강화기술 개발사업의 지원을 받아 수행되었음(과제번호: HG22C001700).

## 참고문헌

박보람, 최동희, 강동화, 2020, "공동주택의 기밀성능에 따른 실외 유입 및 실내 발생 PM 2.5의 계절별 실내농도 기여도 분석", 대한건축학회 논문집-구조계, 36(2), 155-163

박은자, 송은솔, 최슬기, 2021, "의료서비스와 의약품 이용에 대한 코로나바이러스감염증-19의 영향과 정책과제-미충족 의료를 중심으로", 한국보건사회연구원

보건복지부, 2016, "의료기관 환기기준 및 운영 가이드라인 개발"

보건복지부, 2017, "국가지정 입원치료병상 운영과 관리 지침"

보건복지부, 2019, "의료법 시행규칙"

보건복지부, 2020, "코로나19 중증환자 긴급치료병상 시설기준(병동형)"

성민기, 2022, "긴급전환 감염병 격리 치료시설의 기준", 한국의료복지건축학회지, 28(4), 105-109

성민기, 2023, "음압격리병실의 원리와 과제." 설비저널, 52(3), 34-39.

엄예슬, 박보람, 강동화, 2021, "공동주택의 건물 기밀도와 대기 중 먼지 침입지표의 상관관계 분석", 한국건축친환경설비학회 논문집, 15(1), 63-74

이원석, 이세진, 김희강, 여명석, 2022, "이동형 음압기를 적용한 긴급전환형 임시음압격리병실의 실내 환경 측정 분석", 한국의료복지건축학회지, 28(4), 89-97

조진균, 2023, "국가 감염병 대응을 위한 이동형 음압격리병실 및 환기 시스템", 설비저널, 52(3), 22-30

질병관리본부, 2013, "국가지정 밀폐음압 입원치료병상시설의 안전관리 기준 연구"

질병관리본부, 2017, "감염병 관리시설 평가지침"

질병관리본부, 2019, "국가지정 입원치료병상 운영과 관리 지침"

질병관리청, 2020, "권역 감염병 전문병원 사업 안내"

한방우, 2021, "의료시설의 코로나 19 관리-이동형 음압기의 성능 시험 방법 및 성능 기준 개발", Air Cleaning Technology, 34(2), 39-45

홍진관, 2015, "국가지정 입원치료 격리병상 시설적격성 평가분석에 관한 연구", 설비공학논문집, 27(10), 506-514

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers(ASHRAE), 2011, "HVAC Applications", ASHRAE Handbook

- Association of Healthcare International Auditors(AHIA), 2016, "Australasian Health Facility Guidelines"
- Centers for Disease Control and Prevention(CDC), 2019, "Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities"
- Eom, Y. S.; Park, B. R.; Shin, H. W.; Kang, D. H., 2021, "Evaluation of Outdoor Particle Infiltration into Classrooms Considering Air Leakage and Other Building Characteristics in Korean Schools", Sustainability, 13(13), 7382
- Frank Shadpour; Stefanie Johnson, 2020, "Makeshift Negative Pressure Patient Rooms In Response to COVID-19", ASHRAE Journal
- Kim, Mihyeon; Lim, Daeguen; Joo, Peoyngghwa; Hong, Seonghun, 2020, "Archisalon - Architecture that responds to cluster's infection such as COVID-19", Korean Architects, 614, 113-117
- Martin Herrick, 2017, "Planning and maintaining hospital air isolation rooms"
- National Health Service(NHS), 2009, "Health Building Note", 04-01
- Shim, C. H.; Seong, N. C.; Hong, G., 2021, "An Analysis of ACHn for Improving the Performance of Green Remodeling through the Airtightness Measurements", KIEAE Journal, 21(6), 7-12
- Shrestha, P.; DeGraw, J. W.; Zhang, M.; Liu, X., 2021, "Multizonal modeling of SARS-CoV-2 aerosol dispersion in a virtual office building", Building and Environment, 206, 108347
- Yang, S.; Yuk, H.; Yun, B. Y.; Kim, Y. U.; Wi, S.; Kim, S., 2022, "Passive PM2. 5 control plan of educational buildings by using airtight improvement technologies in South Korea". Journal of Hazardous Materials, 423, 126990

접수 : 2023년 11월 16일  
1차 심사완료 : 2023년 11월 27일  
게재확정일자 : 2023년 11월 27일  
3인 익명 심사 필

www.kci.go.kr