

이동형 음압기를 적용한 긴급 전환형 임시음압격리병실의 실내 환경 측정 분석

Measurement and Analysis of Indoor Environment in Emergency Switching
Type Temporary Negative Pressure Isolation Ward that Use Portable
Negative Pressure Units

이원석* Lee, Wonseok | 이세진** Lee, Sejin | 김희강*** Kim, Heegang |
여명석**** Yeo, Myoungsouk

Abstract

Purpose: Because of the recent COVID-19 pandemic, there have been many cases of using portable negative pressure unit to convert general wards into temporary negative pressure isolation wards. The purpose of this study is to analyze the indoor environment of the switching type wards. **Methods:** Field measurements and experiments were conducted in a medical facility. Air volume, wind speed and pressure difference were measured in non-occupant state. Dispersion tests were performed with gas and particle matter. **Results:** The pressure difference between the wards and the corridor was higher than -2.5 Pa in normal situation. However, in the gas and particle dispersion tests, it was found that there were concerns about the spread through leakages in low-airtight walls or ceilings. In addition, it was confirmed that the pressure imbalance in ducts through the non-sealed diffusers could cause back flow during portable unit operation. Furthermore, when there was a pressure difference between adjacent wards planned to be at same pressure level, the possibility of the spread through the leakages was found. **Implications:** When using portable units for making switching type wards, it is necessary to create airtight space and seal the non-operation diffusers. In case of operating the air handling unit, T.A.B must be performed to adjust the duct balancing.

주제어: 이동형 음압기, 임시음압격리병실, 현장 측정, 확산실험

Keywords: Portable negative pressure unit, Temporary negative pressure isolation ward, Field measurement, Dispersion experiment

1. 서론

1.1 배경 및 목적

감염병은 유행하는 시기마다 새로운 변이가 발생하며, 전파력 및 치사율이 상이하다. 2003년 중증급성호흡기증후군(SARS), 2009년 신종 인플루엔자A(H1N1), 2015년 중동 호흡기 증후군(MERS), 2019년 코로나바이러스 감염증(COVID-19)에 이르기까지 2003년 이후 4~6년 주기로 신종 호흡기 감염병들이 지속적으로 발생하고 있다.

MERS 사태 이후 국내에서도 신종 감염병의 예방 및 관리에 대한 대응 체계를 구축하고 있다. 특히 신종 감염병 환자를 진료하는 과정에서 병원 내 2차 감염을 억제하고 의료진의 안전 확보 및 원인 병원체의 지역사회 전파를 방지하기 위해, 오염도가 낮은 비음압구역에서 오염도가 높은 음압격리구역으로 기류가 흐르도록 실내의 공기압력을 조정한 음압격리병실(Negative Pressure Isolation Ward)을 운영하고 있다.

하지만 2019년 발생한 COVID-19라는 전례 없는 감염병으로 팬데믹 사태가 발생했으며, 이로 인해 기존 설치된 국가지정 음압격리병상의 수용 능력이 한계에 이르게 되었다. 따라서 HEPA 필터가 장착된 이동형 음압기를 이용해 일반 병실을 음압실로 전환한 긴급 전환형 임시음압격리병실을 운영한 사례가 다수 발생하였다. 국가지정 음압격리병실의 경우 명확한 시설

* 회원, 석사과정, 건축학과, 서울대학교 (주저자: wsl95@snu.ac.kr)
** 회원, 박사수료, 건축학과, 서울대학교 (qkqhtpwls@snu.ac.kr)
*** 회원, 선임연구원, 건설환경중합연구소, 서울대학교 (etoile9@snu.ac.kr)
**** 이사, 교수, 건축학과, 서울대학교 (교신저자: msyeo@snu.ac.kr)

운영·관리 지침과 다수의 연구가 진행되었지만, 이동형 음압기를 이용한 임시음압격리병실에 대한 시설 운영·관리 지침과 관련 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구는 이동형 음압기를 설치하여 운영한 긴급 전환형 임시음압격리병실의 실내 환경 측정 및 분석을 통하여 호흡기 감염병의 감염원 확산 가능 경로를 파악하고 이동형 음압기 설치 시 고려되어야 할 점을 도출하기 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

1.2 기존 연구 문헌 고찰

본 연구의 목적과 유사한 범위 내에서 국가지정 음압격리병실 또는 임시음압격리병실의 감염원 확산 가능성을 파악하고자 현장 측정 및 실험을 수행한 기존 연구는 다음과 같다.

먼저, 국내의 국가지정 음압격리병실을 대상으로 현장에서 추적가스(SF₆ 가스)를 이용한 가스 확산실험을 수행한 결과 설비 시스템의 오작동시 병실 내부의 추적가스가 외부로 유출되었으며 특히, 병실 내부의 배기 설비가 오작동할 경우 유출량이 증가된 것으로 보고된 바 있다(Park, et al., 2015).

이동형 음압기 등을 설치하여 임시음압격리시설을 구축하는 경우, 임시격리병동 입구에 임시 전실을 설치하고 내부에 이동형 음압기를 설치하여 병동 단위 공간을 음압으로 구현한 실험 사례에서는 CDC에서 제시한 기준 이상으로 임시 전실과 병동 내부의 압력 차이를 구현하였지만 병동 내부의 병실에서 기류가 일부 역류하는 문제를 발견하였다(Miller, et al., 2017). 또한, 일반 병실 내 공간을 플라스틱 비닐 재질의 가림막으로 나누어 공간 중 일부를 임시 전실로 활용하고자 할 때, 병상이 위치한 공간과 임시 전실에 모두 이동형 음압기를 설치하여 입자상 물질(Poly Alpha Olefin 입자)의 확산실험을 수행한 사례도 있었다(Mousavi, et al., 2020). 이 연구 결과에 따르면 이동형 음압기 가동 자체로 병실 내 오염물질 농도를 낮출 수 있었으며, 이동형 음압기 작동이 중지되어 실간 차압이 형성되지 않더라도 임시 가림막이 병실에서 발생시킨 입자상 물질의 확산을 일부 방지할 수 있었다. 그러나, 실간 차압이 형성된 상황에서도 입자상 물질의 일부가 병실 외부 공간으로 확산되는 것으로 나타났다.

1.3 연구방법 및 범위

본 연구는 이동형 음압기를 사용하여 음압을 형성한 긴급 전

환형 임시음압격리병실을 대상으로 풍량, 풍속, 실간 차압 등을 측정하고 가스 및 입자를 활용한 감염원 모사 실험을 수행하여 결과를 분석한 것으로서 연구 방법 및 범위는 아래와 같다.

1) 긴급 전환형 임시음압격리병동을 운영한 국내 종합 병원 중 팬데믹 당시와 동일하게 실내 환경 조성이 가능한 병동 내 연속된 세 개 병실을 대상으로 측정을 진행하였다.

2) 현장의 실내 공조 현황을 분석하고 병실 내부에 설치된 이동형 음압기의 풍량, 각 병실 및 복도에 대한 공조 급배기구의 풍속과 실간 차압을 측정하여 기류 방향을 추정하였다.

3) 연속된 세 개 병실 중 가운데 병실을 기준으로 병실 내부에서 가스상 물질(SF₆ 가스)과 입자상 물질(시판 모기향)을 방출하고 실내 농도 변화를 측정하여 오염물질의 실내 확산 경로를 분석하였다.

4) 이상의 실내 환경 측정 및 분석을 통해 이동형 음압기를 적용한 임시음압격리병실 구축 시 예상되는 문제점 및 시사점을 도출하여 정리하였다.

본 연구에서는 감염원 확산 가능성과 경로를 파악하고자 하는 것을 주목적으로 하였으므로, 실내 온습도 및 소음도 분석은 포함하지 않았다.

2. 임시음압격리병실 관련 가이드라인

2.1 국외 가이드라인

미국의 경우 다수의 기관에서 이동형 음압기를 활용한 임시 음압격리병실과 관련된 가이드라인을 적용하고 있었다(표 1).

2.2 임시음압격리병실의 유형

국외 가이드라인에서 제시한 이동형 음압기를 적용한 다양한 형태의 임시 음압 격리병실을 정리해 보면 약 다섯 가지의 유형으로 분류될 수 있으며(그림 1), 각 유형에 따른 임시음압격리병실 등 실내 공조 운영지침이 기술되어 있다(표 2). 하지만 복도와 화장실 공조 운영에 대한 명확한 지침은 없었다.

한 편, 국내에서는 직접 배기형만을 채택하여 다인실용 일반 병실을 전환한 임시음압격리병실을 구축하였으며, 건축·설비 부분의 가이드라인 부재로 복도와 병실 사이의 실간 차압 기준(-2.5Pa 이상)을 중심으로만 운영되고 있었다.

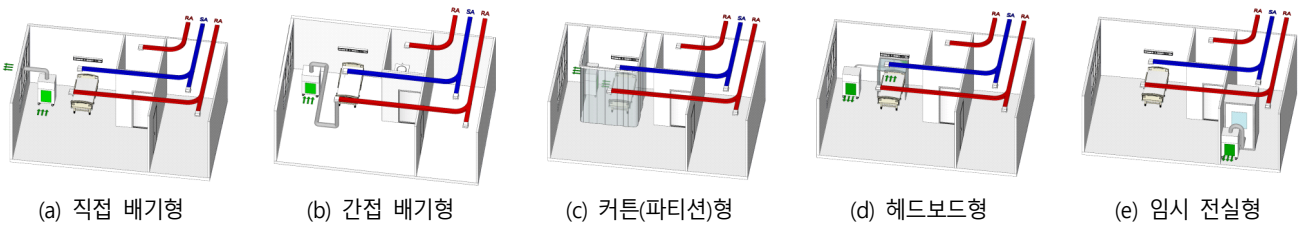
[표 1] 이동형 음압기를 활용한 임시음압격리병실 관련 국외 가이드라인

발행기관	연도	가이드라인
Oklahoma State Department of Health	2005	Design and Implementation Guidelines for Airborne Infectious Isolation under Epidemic Emergency Response Conditions
Minnesota State Department of Health	2010	Airborne Infectious Disease Management: Methods for temporary Negative Pressure Isolation
	2020	Guidelines for Temporary Negative Pressure Isolation Rooms
NIOSH	2012	Expedient Methods for Surge Airborne Isolation within Healthcare Settings during Response to a Natural or Man made Epidemic
ASHE/ASHRAE	2021	Current/Updated Health Care Facilities Ventilation Controls and Guidelines for Management of Patients with Suspected or Confirmed SARS-CoV-2 (COVID-19)

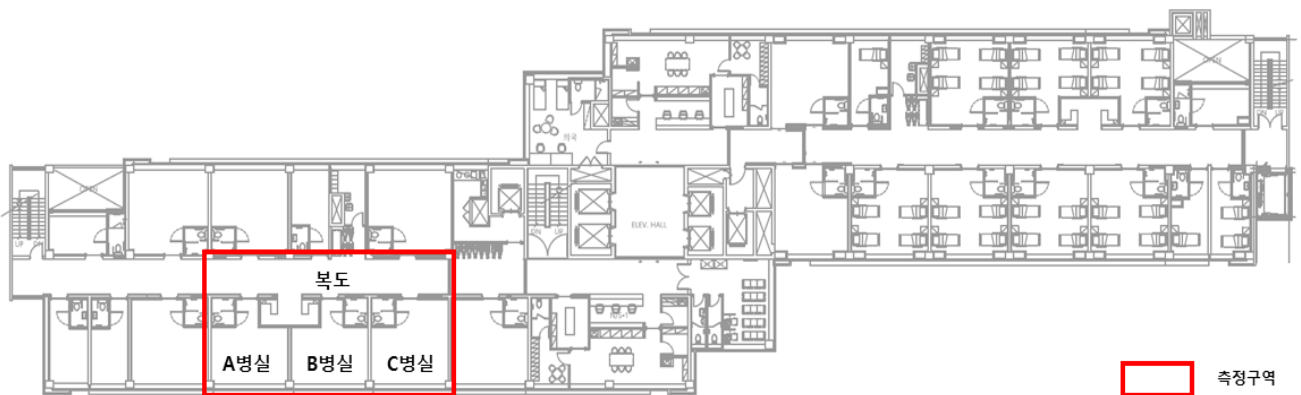
[표 2] 국외 가이드라인에 제시된 이동형 음압기 설치 유형

구분	외기 배기형		내부 순환형			
	직접 배기형	간접 배기형	커튼(파티션)형	헤드보드형	임시 전실형	
배기 위치	병실 외부 (외기)	병실 외부 (배기 덕트)	병실 내부	병실 내부	복도 내부	
설치 위치	병실	병실	병실	병실	병실 출입문 앞 복도	
중요 운영 기준	병실 급기	O	O	△	△	O
	병실 배기	X	O	△	△	X / O
	복도 급기	?	?	?	?	?
	복도 배기	?	?	?	?	?
	화장실 배기	O	?	△	△	O
음압 형성 구역	병실	병실	병실 내 일부 구역	-	임시 전실	
실간 차압 기준	2.5 Pa	2.5 Pa	-	-	-	

참조: [O: 가동, △: 실험에 따라 운영 기준 상이, X: 미가동, ?: 가이드라인상 명시되어 있지 않음]



[그림 1] 국외 가이드라인에 제시된 이동형 음압기 설치 유형



[그림 2] 현장 조사 대상 병동 내 실내 환경 측정구역

3. 현장 조사 및 실내 환경 측정 대상

현장 조사 및 측정은 팬데믹 발생 시 이동형 음압기를 활용하여 긴급 전환형 임시음압격리병실을 구축한 종합병원을 대상으로 하였다. 실내 환경 측정구역은 이동형 음압기를 설치한 연속된 3개의 병실과 병실 앞 복도로, 병실 내 호흡기 감염원 발생 시 인접한 공간으로 감염원이 확산될 가능성이 있는 위치로 판단되어 측정구역으로 선정하였다(그림 2).

[그림 2]에 나타난 측정구역의 병실 중 B 병실을 기준 병실로, A와 C병실을 인접 병실로 설정하여 실험 계획을 수립하였다. 각 병실의 체적은 A와 B 병실이 약 69 m³, C 병실이 약 78 m³, 각 병실 내 화장실은 약 7.3 m³로 확인하였다.

현장 측정기간 동안 대상 건물 해당층의 공조설비는 팬데믹 기간 운영 상황과 같게 모사하였다. 해당층의 병실과 복도의 중

양식 급배기는 가동을 중지하였으며, 각 병실 내 화장실의 중앙식 배기는 가동하였다. 이때 모든 디퓨저는 밀폐 처리를 하지 않은 상태였다.

실내 측정구역을 제외한 병실 및 부속실은 환자와 의료진이 상주하고 있는 상황으로, 측정 시 통제할 수 없는 외부 요인으로 작용했음을 밝힌다.

4. 환경 측정 내용 및 방법

4.1 기초환경 측정

음압격리병실에서 기류는 이동형 음압기와 급·배기구 풍량 차이로 형성되는 실간 차압에 지배적인 영향을 받는다. 감염원 모사 확산실험 시 풍량 및 차압 변화에 따른 샘플링 위치별 농

도 비교를 통해 이동 경로 파악이 가능할 것으로 예상되어, 실간 차압에 주요한 변수로 작용하는 실내 이동형 음압기의 풍량을 조건별로 다르게 설정하여 실험을 진행하였다(표 3).

실험 조건별 이동형 음압기의 풍량은 후드형 풍량계를 배기 부위에 밀착하여 측정하였으며, 천장부 급·배기구의 경우 현장에서 천장 마감재에 후드형 풍량계를 밀착하는 것이 불가능하여 디지털 열선풍속계 이용하여 풍속을 측정하였다. 실간 차압은 차압계를 이용하여 각 복도-병실, 병실-화장실의 실간 차압을 측정하였고, 각 실의 급·배기구 작동 방향과 실내 기류의 이동 방향 확인을 위하여 연무기를 활용하였다(표 4, 그림 4).

4.2 감염원 모사 확산실험

본 실험은 호흡기 감염원 중 5 µm 이상의 큰 비말(분비물) 입자들이 비말을 매개체로 전파되는 비말감염과 5 µm 이하의 작은 비말핵 입자들이 공기를 매개체로 하여 전파되는 공기감염의 실내 이동 경로를 분석하고자 하였다.

중력과 정전기력에 의해 짧은 거리 내에서 침적되는 비말감염의 확산은 입자상 물질과 거동이 유사하며, 중력에 영향을 적게 받아 넓은 범위를 장시간 부유하는 공기감염은 가스상 물질과 거동이 유사할 것으로 예상되었다. 이에 따라 미세먼지(모기향)와 추적가스(SF₆ 가스)를 감염원으로 모사하여 확산실험을 진행하였다.

감염원 모사 확산실험 및 측정은 각 물질을 측정할 수 있는 장비를 활용하고, Case별로 샘플링 위치를 변경하여 2022년 09월 20일 09시 00분부터 09월 22일 15시 00분까지 진행하였다(표 4, 그림 3, 그림 5).

[표 3] 측정구역 병실 내 이동형 음압기 설정 풍량

조건		이동형 음압기 풍량		
		A병실	B병실	C병실
Case 1	Case 1-1	중간	중간	중간
	Case 1-2	최대	최대	최대
Case 2	Case 2-1	중간	가동 중지	중간
	Case 2-2	최대	가동 중지	최대

참조: 측정값 평균풍량 [중간: 약 723.4 CMH, 최대: 약 1,689.4 CMH]

[표 4] 측정 요소에 따른 측정 장비

측정 요소	측정 장비
풍량	Testo 420
풍속	CLIMOMASTER 6501
실간 차압	Testo 400
가스상 물질(SF ₆)	INNOVA multi-gas monitor
입자상 물질(PM _{2.5})	PurpleAir PA-II



[그림 3] 감염원 모사 확산실험용 측정기기 설치 위치



(a) 이동형 음압기 풍량 측정 (풍량계)



(b) 급·배기구 풍속 측정 (열선풍속계)



(c) 실간 기류 측정(연무기)

[그림 4] 기초환경 측정 현황



(a) 가스상 물질 방출 및 측정장치



(b) 입자상 물질 측정장치

[그림 5] 감염원 모사 확산실험 현황

1) 가스상 물질 확산실험

일반적으로 실험에 사용되는 SF₆ 가스는 추적가스로서 대기 중에서 자연적으로 발생하지 않으며 극히 낮은 농도에서도 검출될 수 있기때문에 공간 내 오염물질의 양을 정량화하는 실험에 사용된다(David L. Johnson, 2005).

HEPA 필터 사용 시 공기 중 0.3 μm 크기의 입자는 99.97% 여과되나, SF₆ 가스는 여과되지 않는 성질을 가지므로, 가스상 물질 확산실험에서는 감염원이 여과되지 않는 상황으로서 가장 위험한 상황을 모사하여 실험을 진행하였다.

가스상 물질 확산실험 시 감염원으로 모사된 SF₆ 가스의 농도는 15 ml/s로 일정하게 방출되었으며, 이는 성인 평균 호흡량의 약 10%정도 수준이다. 가스 방출 및 샘플링 위치는 환자가 눕거나 앉아있는 것을 가정하여 1.2 m 높이로 설정하였고, 플래넘에서 샘플링 한 경우에는 2.4 m 높이에 샘플링 튜브를 부착하여 가스 농도를 측정했다.

가스상 물질 확산실험에 앞서서는 배경농도 안정화를 위해 각 Case별 1~2시간 환기를 수행하였다. 가스 방출 시에는 실내 농도가 상승하는 것을 확인한 후 약 1~2시간 동안 상기된 일정 농도로 가스를 방출하였다. 각 지점에서는 멀티가스 모니터를 이용해 배경농도 및 실험 시 농도변화를 측정하였다.

2) 입자상 물질 확산실험

입자상 물질 확산실험에서는 시판되는 모기향에서 발생하는 입자를 감염원으로 모사하였다. 실험에 사용된 모기향은 발화 시 대부분 입경 0.1~0.3 μm로 산란되는 것으로 가정하였다(Weili Liu, 2003). 측정 장비는 2.5 μm 이하의 입자(PM_{2.5}) 농도 측정에 높은 정확도를 보이는 low-cost 센서인 PurpleAir PA-II를 사용하였으며(B. C. Singer, 2018, Shruti Hegde, 2020), 측정 지점의 1.2 m 높이에 설치하였다.

가스상 물질 확산실험과 마찬가지로 실험에 앞서 배경농도 안정화를 위해 각 Case별 1~2시간 환기를 수행하고, 실내 농도 상승 후 약 1~2시간 동안 입자를 발생시켰다. 각 지점에서는 상기된 장비와 실험용 PC와의 연동을 통해 실시간으로 배경농도 및 실험 시 농도변화를 측정하였다.

5. 환경 측정 결과 분석

5.1 기초환경 분석

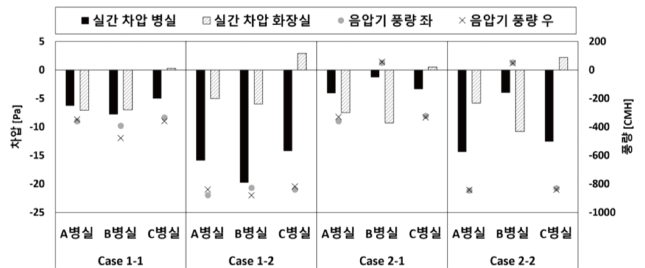
이동형 음압기를 중간 풍량으로 작동한 Case 1-1과 최대 풍량으로 작동한 Case 1-2에 대해 비교하였을 때, 이동형 음압기의 풍량이 증가함에 따라 실간 차압은 증가하는 것으로 측정되었다(그림 6, [표 5]).

단, 측정 시 각 장비별 작동 풍량을 동일하게 설정하였으나, [표 5]에서 나타난 것과 같이 실별 이동형 음압기의 풍량이 다르게 측정된 것은 현장에서 사용하던 장비를 그대로 설치한 것으로서 필터 노후도에 따른 차이인 것으로 판단하였다.

기준 병실인 B 병실의 이동형 음압기의 가동을 중지하고 인접 병실(A 병실, C 병실)의 풍량을 중간 풍량으로 작동한 Case 2-1과 최대 풍량으로 작동한 Case 2-2를 비교하였을 때, 기준 병실은 인접 병실 대비 복도-병실 간 차압이 크게 감소하였다. 이때, 기준 병실의 화장실 배기 풍량과 인접 병실에서 가동되는 이동형 음압기 풍량의 영향으로도 기준 병실의 음압이 형성되는 것으로 판단되었다(그림 6, [표 5]).

한편, 이동형 음압기 가동 시 화장실 덕트 내 압력 불균형을 일으켜 C 병실 화장실 배기구에서 공기가 역류하는 것을 확인하였으며(그림 7), 기밀하지 않은 병실 내 천장부로부터 하강 기류가 발생하는 것을 연무기를 통해 확인하였다. 이로 인하여, C 병실의 화장실이 병실 대비 양압으로 형성되어 화장실 내 기류가 병실로 유입되었으며, 플래넘 공간을 통해 병실 내부와 복도로 이동하는 기류가 형성되는 것으로 예상되었다.

또한 이동형 음압기 풍량의 증가는 밀폐되지 않은 급·배기구와 화장실 배기구에서의 풍속을 증가시켜 역류량이 증가하도록 하는 동시에 천장부에서 하강하는 기류량을 증가시키는 문제를 발생시켰다.



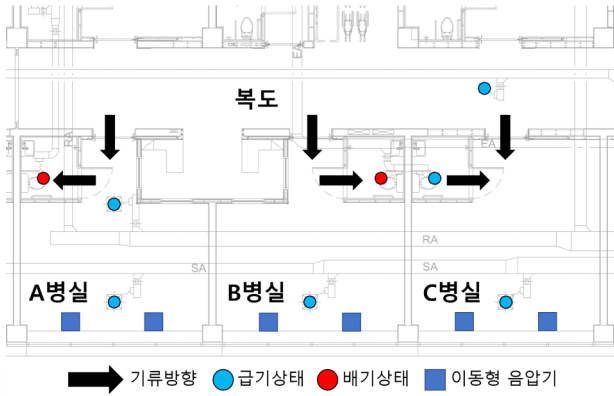
[그림 6] Case별 이동형 음압기 풍량 및 실간 차압 그래프

[표 5] Case별 이동형 음압기 풍량 및 실간 차압 측정값

단위 [풍량: CMH, 환기횟수: 회/h, 차압: Pa]

Case	측정값	이동형 음압기 풍량				실간 차압	
		좌	우	합계	환기횟수 환산	복도 → 병실	병실 → 화장실
Case 1-1	A병실	- 360	- 348	- 708	10.26	- 6.3	- 7.1
	B병실	- 392	- 478	- 870	12.60	- 7.8	- 7.0
	C병실	- 334	- 360	- 694	8.89	- 5.0	+ 0.3
Case 1-2	A병실	- 879	- 840	- 1,719	24.91	- 15.9	- 5.0
	B병실	- 828	- 881	- 1,709	24.76	- 19.8	- 6.0
	C병실	- 840	- 818	- 1,658	21.25	- 14.2	+ 2.9
Case 2-1	A병실	- 360	- 329	- 689	9.98	- 4.1	- 7.5
	B병실	+ 51	+ 56	+ 107	1.55	- 1.3	- 9.3
	C병실	- 322	- 334	- 656	8.41	- 3.4	+ 0.5
Case 2-2	A병실	- 847	- 842	- 1,689	24.47	- 14.4	- 5.8
	B병실	+ 53	+ 48	+ 101	1.46	- 4.0	- 10.8
	C병실	- 830	- 842	- 1,672	21.43	- 12.6	+ 2.2

참조: [+ : 실내로 급기되는 풍량, -: 실외로 배기되는 풍량]



[그림 7] 출입문 및 디퓨저를 통한 실내 기류 이동

[표 6] Case별 급·배기 디퓨저 풍속 측정값

단위 [풍속: m/s]

Case	풍속		디퓨저 풍속		
	급기	배기(RA)	배기(EA)		
Case 1-1	A병실	병실	0.3 (↓)	-	-
		화장실	-	-	4.6~4.8 (↑)
	B병실	병실	1.7 (↓)	-	-
		화장실	-	-	3.5~3.6 (↑)
	C병실	병실	1.2 (↓)	1.24 (↓)	-
화장실		-	-	0.3 (↓)	
복도		0.1 (↓)	-	-	
Case 1-2	A병실	병실	0.6 (↓)	-	-
		화장실	-	-	4.0 (↑)
	B병실	병실	2.1 (↓)	-	-
		화장실	-	-	3.1 (↑)
	C병실	병실	2.0 (↓)	2.1 (↓)	-
화장실		-	-	1.2 (↓)	
복도		0.5 (↓)	-	-	
Case 2-1	A병실	병실	0.3 (↓)	-	-
		화장실	-	-	5.3~5.4 (↑)
	B병실	병실	0.8 (↓)	-	-
		화장실	-	-	4.3~4.6 (↑)
	C병실	병실	1.0 (↓)	1.05 (↓)	-
화장실		-	-	0.3~0.4 (↓)	
복도		0.1 (↓)	-	-	
Case 2-2	A병실	병실	0.5 (↓)	-	-
		화장실	-	-	5.4 (↑)
	B병실	병실	0.9 (↓)	-	-
		화장실	-	-	2.7~2.8 (↑)
	C병실	병실	1.9 (↓)	1.85 (↓)	-
화장실		-	-	1.1 (↓)	
복도		0.2 (↓)	-	-	

참조: [↑: 디퓨저 위로 상승하는 기류, ↓: 디퓨저 아래로 하강하는 기류]

5.2 이동형 음압기 풍량에 따른 감염원 모사 물질 농도 분석

이동형 음압기 작동 풍량 변화를 통해 감염원 확산 경로를 파악하고자 Case별 측정 지점에서의 감염원 모사 물질 농도 분포를 분석하였다. 이때 사용된 값들은 방출 병실인 B 병실의 농

도가 안정화된 이후를 기준으로 하였으며, 방출 시작 후 약 20분 후부터 측정 종료 시까지 값을 사용하여 분석하였다.

1) 가스상 물질 확산 분석

(1) 전체 병실 이동형 음압기 가동 시 Case 분석

[Case 1-1(중간 풍량), Case 1-2(최대 풍량)]

각 병실의 이동형 음압기를 가동한 Case 1을 비교하면 기준 병실과 인접한 실들에 검출된 상대농도는 음압기 풍량 증가 시 상승하는 것처럼 보인다. 하지만 풍량이 증가하면 배기량이 증가하게 되어 중간 풍량 대비 기준 병실 자체의 평균농도가 낮아지며, A 병실을 제외한 대부분의 인접한 실들에서 검출된 실제 평균농도 또한 낮은 것으로 나타났다.

B 병실 화장실에서 검출된 SF₆ 가스 상대농도는 최소 70.6%, 최대 88.8%로 이동형 음압기를 통한 배기와 함께 화장실을 통해서도 배기가 되었다. 하지만 이동형 음압기를 가동하게 되면 연결된 화장실 덕트의 압력을 불균형하게 만들어 일부 화장실 덕트에서는 역류가 발생하게 된다. 따라서 B 병실 화장실 덕트로 배기 되는 SF₆ 가스 중 일부가 C 병실 화장실 덕트로 역류하는 공기를 통해 C 병실 화장실로 확산되어 1.8ppm의 농도가 검출되었다. 음압으로 형성된 A병실 내부에서 3.2~3.3ppm 농도 검출과 C병실의 농도(4.9ppm)가 화장실(1.4ppm) 보다 높게 검출되는 것을 통해 압력 불균형으로 인한 역류가 C 병실 화장실 덕트 외 환자가 입실한 병실에서도 발생하여 확산된 것으로 예상되었다.

이외에도 병실 내부 공간뿐만 아니라 B와 C 병실 상층부인 플레넘에서의 SF₆ 가스 검출(10.5%, 7.6%)로 기밀하지 않은 플레넘 부위도 확산 경로가 되는 것으로 파악되었다.

(2) 기준 병실 이동형 음압기 가동 중지 Case 분석

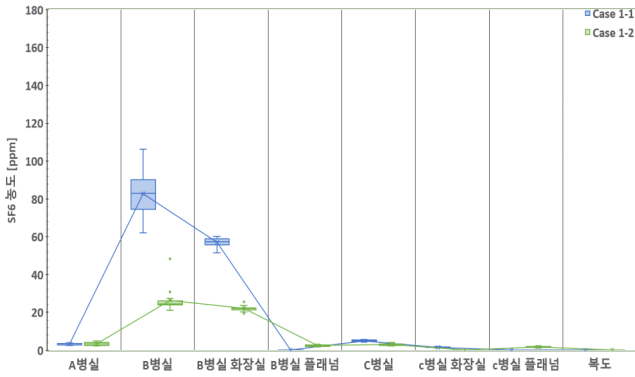
[Case2-1(중간 풍량), Case2-2(최대 풍량)]

SF₆ 가스를 방출하는 기준 병실인 B 병실의 이동형 음압기 가동을 중지하게 되면 기준 병실 화장실에서 검출되는 상대농도가 최소 90%, 최대 95.5%로 나타나, 주로 화장실을 통해 기류가 이동하는 것을 확인하였다.

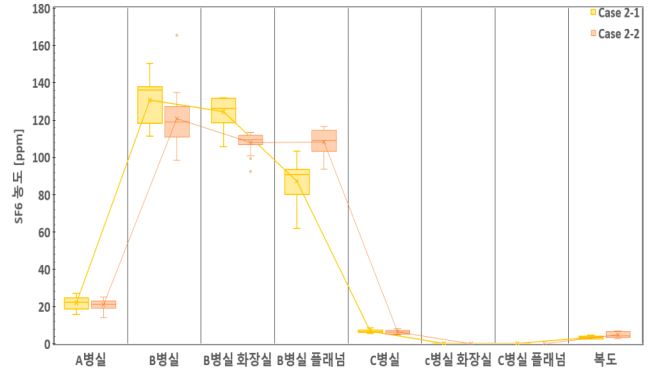
양측 인접 병실의 이동형 음압기 풍량을 중간으로 가동할 때 B 병실 플레넘의 상대농도는 66.6%, 최대로 가동할 때는 90.4%로 플레넘이 주된 확산 경로로 파악되었으며, 플레넘을 통해 인접한 병실과 복도로 확산된 것으로 판단되었다.

Case별 인접 병실간 상대농도 비교 시 Case 2-1의 A병실 16.6% C병실 5.1%, Case 2-2 A병실 17.3% C병실 5.3%로 두 병실 중 차이는 큰 A병실로 3.2배 더 많이 확산되었다. 또한 플레넘으로 이동한 SF₆ 가스는 기밀하지 않은 천장부 누기 부위의 하강하는 공기를 통해 복도와 병실로 확산되었다.

복도에 측정된 상대농도와 [표 6]의 풍속을 바탕으로 이동형 음압기의 풍량 증가는 화장실 덕트 역류와 기밀하지 않은 천장부 하강기류의 양을 증가시켜 병실 및 복도로의 확산을 가중시키는 것으로 판단된다.



(a) Case 1 실험 시 SF₆ 가스 농도 분포



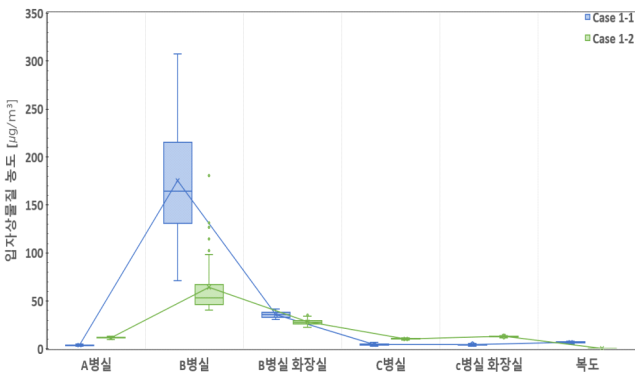
(b) Case 2 실험 시 SF₆ 가스 농도 분포

[그림 8] 측정 지점별 가스상 물질 농도 분포

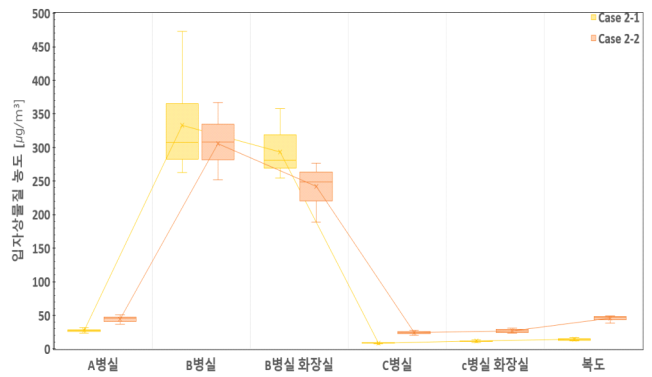
[표 7] 측정 지점별 SF₆ 가스 평균 농도

단위 [절대농도: ppm, (상대농도: %)]

Case		절대(상대)농도	A병실	B병실 (기준)	B병실 화장실	B병실 플래넴	C병실	C병실 화장실	C병실 플래넴	복도
Case 1	Case 1-1		3.2 (4.0)	82.5 (100)	57.0 (70.6)	-	4.9 (6.1)	1.4 (1.8)	-	-
	Case 1-2		3.3 (15.2)	26.2 (100)	21.9 (88.8)	2.3 (10.5)	2.9 (12.9)	-	1.6 (7.6)	-
Case 2	Case 2-1		21.8 (16.6)	130.6 (100)	124.3 (95.5)	87.1 (66.6)	6.6 (5.1)	-	-	3.3 (2.5)
	Case 2-2		21.1 (17.3)	120.7 (100)	107.9 (90.4)	108.2 (90.4)	6.4 (5.3)	-	-	4.8 (4.2)



(a) Case 1 실험 시 PM_{2.5} 농도 분포



(b) Case 2 실험 시 PM_{2.5} 농도 분포

[그림 9] 측정 지점별 입자상 물질 농도 분포

[표 8] 측정 지점별 PM_{2.5} 평균 농도

단위 [절대농도: µg/m³, (상대농도: %)]

Case		절대(상대)농도	A병실	B병실 (기준)	B병실 화장실	C병실	C병실 화장실	복도
Case 1	Case 1-1		3.5 (2.2)	175.1 (100)	35.5 (22.5)	4.2 (2.7)	4.2 (2.7)	6.7 (4.2)
	Case 1-2		11.4 (20.4)	63.7 (100)	27.8 (48.6)	10.2 (18.5)	12.7 (22.9)	-
Case 2	Case 2-1		27.6 (8.5)	332.9 (100)	293.0 (89.2)	8.8 (2.7)	11.6 (3.6)	14.2 (4.5)
	Case 2-2		44.5 (14.6)	305.3 (100)	242.1 (79.4)	24.2 (7.9)	26.9 (8.8)	45.7 (15.0)

2) 입자상 물질 확산 분석

입자상 물질 확산 분석 시에는 측정 조건상 측정 구역 외의 입원실에서 문과 창문을 열어두고 생활할 점과 의료진들의 이동으로 인하여 복도에서 측정된 PM_{2.5}의 농도는 통제되지 않은 외부 영향으로 발생하였으므로 분석에서 제외하였다.

(1) 전체 병실 이동형 음압기 가동 시 Case 분석

[Case 1-1(중간 풍량), Case 1-2(최대 풍량)]

각 병실의 이동형 음압기를 가동한 Case 1을 비교하면 이동형 음압기의 풍량이 증가할수록 배기량도 증가하게 되어 기준 병실 자체의 평균농도가 낮아지게 된다. 하지만 풍량이 증가하면 인접한 실들의 평균농도 또한 낮아지는 가스상 물질과는 달리 입자상 물질은 이동형 음압기의 영향을 직접적으로 받는 A와 C 병실 내부는 풍량 증가에 의해 기존 병실 내부(바닥, 천장)에 존재하던 입자들이 공기 중으로 부유하는 양이 많아져 평균농도가 증가하는 것으로 분석되었다.

입자상 물질 확산도 가스상 물질 확산과 유사하게 이동형 음압기를 통해 외부로의 배기와 화장실 덕트를 통한 배기가 이루어졌으며, B 병실 덕트로 배기되는 입자물질 중 일부가 C 병실 화장실 덕트로 역류하는 공기를 통해 C 병실 화장실로 확산된 것으로 판단된다. 더불어, C 병실 화장실 평균농도 Case 1-2(12.7ppm)가 Case 1-1(4.2ppm)보다 3배 이상 높아지는 것으로 보아 풍량이 증가하면 덕트 압력의 불균형이 심화되어 역류량과 감염원 모사 물질의 확산량이 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 기준 병실 이동형 음압기 가동 중지 Case 분석

[Case2-1(중간 풍량), Case2-2(최대 풍량)]

기준 병실인 B 병실의 음압기 가동을 중지하게 되면 기준 병실 화장실에서 검출되는 상대농도가 최소 79.4%, 최대 89.2%로 나타나, 화장실로 기류가 이동하는 것을 확인하였다.

그러나, 양측 인접 병실의 이동형 음압기 가동으로 인해 덕트 내 역류가 발생하게 되어 Case 2-1에서 3.6%의 입자물질이 C 병실 화장실로 확산되었다. 또한 Case 1-2와 마찬가지로 풍량 증가는 역류량과 오염물질 확산을 증가시켜 풍량이 증가한 Case 2-2는 상대농도가 8.8%로 상대적으로 풍량이 낮은 Case 2-1에 비해 2배 이상 높은 것으로 나타났다. Case별 인접 병실 간 상대농도 비교 시 병실 사이의 누기 부위를 통해 Case 2-1의 A 병실 8.5% C 병실 2.7%, Case 2-2 A 병실 14.6% C 병실 7.9%로 두 병실 중 차압이 큰 A 병실로 최소 1.8배, 최대 3.1배 더 많이 확산되었다. 입자상 물질도 가스상 물질과 마찬가지로 차압이 큰 병실로 더 많이 확산되는 것으로 판단된다.

5.3 소결

이동형 음압기를 적용한 긴급 전환형 임시음압격리병실의 감염원 확산 경로 파악을 위하여 기초 환경 측정 및 감염원 모사 물질 확산 실험을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

병실별 이동형 음압기 풍량의 변화에 따라 풍속과 차압에 변화가 있었으며, 이에 따라 측정 지점별 감염원 모사 물질 농도

를 통해 감염원의 확산 경로를 파악할 수 있었다.

음압기 가동은 실간 목표 차압 형성을 가능하게 하며, 풍량 증가는 실간 차압 증가에 영향을 끼친다. 하지만 음압기 가동은 밀폐처리 되지 않은 급배기구와 화장실 덕트 압력을 불균형하게 만들어 공기 역류를 발생과 기밀하지 않은 천장부로부터 하강기류가 생기도록 하는 것으로 나타났다.

전체 병실의 이동형 음압기가 가동되고 있을 때 가스상 물질과 입자상 물질의 확산실험 결과, B 병실의 물질이 화장실로 역류하는 공기를 통해 C 병실 화장실로 확산되는 것으로 나타났다. 이동형 음압기 풍량을 최대로 증가시킨 경우에는 C 병실 화장실에서 검출된 입자 물질의 평균농도는 중간 풍량과 비교했을 때 약 3배 높은 수치로 풍량 증가는 덕트 압력의 불균형을 심화시켜 역류량과 감염원 확산을 증가시키는 것으로 분석된다.

또한, 병실 내부뿐만 아니라 상층부 플레넘에서의 가스상 물질 검출을 통해 기밀성이 떨어지는 플레넘 또한 감염원의 확산 경로가 될 것으로 예상되었다.

기준 병실의 이동형 음압기 가동을 중지하였을 때, 감염원 모사 물질은 이동형 음압기가 작동 중인 인접 병실 중 차압이 높은 병실로 더 많이 확산되는 경향을 보였다. 더불어, B 병실의 플레넘에서 검출된 가스상 물질의 상대농도는 66.6~90.4%로 기밀하지 않은 천장 및 플레넘의 누기 부위에서 발생하는 기류의 이동을 통해 감염원이 인접실과 복도로 확산되게 하는 주요 경로로 예상되었다. 가스상 물질과 입자상 물질 측정 결과 이동형 음압기 풍량 증가 시 C 병실 화장실과 복도에서 검출되는 농도 상승을 통해, 풍량 증가로 인한 덕트 내 압력 불균형 심화는 오염확산의 주요 원인으로 분석되었다.

6. 결론

본 연구는 이동형 음압기를 적용한 긴급 전환형 임시음압격리병실의 실내 환경 측정 및 분석을 통해 감염원의 확산 가능성과 그 경로를 파악하고, 이동형 음압기 설치 시 고려되어야 할 점을 도출하여 향후 긴급 전환형 병동 구축 및 운영 시 기초자료를 제공하고자 수행되었다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 기밀하지 않은 천장부 및 플레넘의 누기는 감염원의 확산 경로가 될 수 있으며, 실간 차압 형성 시 이동형 음압기의 풍량이 높게 요구되는 원인으로 작용하므로 이동형 음압기 설치 전 건축적 측면에서 누기 부위에 대한 기밀 처리가 선행되어야 한다.

2) 이동형 음압기는 필요 실간 차압 형성이 가능하고 병실 자체의 감염원 농도를 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 이동형 음압기 작동 풍량으로 인해 기존 덕트들의 압력 균형이 깨지고 역류하는 공기를 통해 감염원이 확산될 가능성이 나타났다.

따라서, 중앙 공조 설비를 가동하지 않더라도 가동하지 않는 급배기구는 교차오염 방지를 위해 밀폐하여야 하며, 공조 설비

를 운영하는 경우에는 T.A.B.를 실시하여 덕트 압력을 조정하는 절차가 필요할 것으로 판단된다.

3) 인접 병실간의 차압을 배제하고 복도와 병실간의 차압 기준만을 충족시키는 경우, 기류는 인접 병실 중 차압이 높은 곳으로 이동하게 되어 병실 간벽 등 누기 루트를 통한 감염원 확산이 우려되었다. 그러므로 복도-병실간 차압을 기준으로 할 때, 각 병실은 되도록 같은 차압 수준을 유지하여야 인접 병실간의 압력 차이로 인한 누기를 최소화 할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 측정 구역 외의 병실이 이용 중인 점과 병동 전체가 아닌 연속된 세 개의 병실에 한하여 진행되었다는 점 등 외부 요인을 통제할 수 없었다는 점에서 한계를 가진다. 향후에 보다 정확한 감염원 확산 경로 파악과 대안 마련을 위해서는 외부 요인 통제와 함께 병동 전체에 대한 측정 및 시뮬레이션 분석 등이 추가로 진행될 필요가 있다.

사사: 본 연구는 보건복지부의 재원으로 감염병의료안전강화 기술개발사업 지원에 의하여 이루어진 것임(과제고유번호 : HG22C0017)

참고문헌

- B. C. Singer ; W. W. Delp, 2018, "Response of consumer and research grade indoor air quality monitors to residential sources of fine particles", Indoor Air 28.4, p.624-639
- David L. Johnson, 2005, "Oklahoma State Department of Health Design and Implementation Guidelines for Airborne Infectious Isolation under Epidemic Emergency Response Conditions", Oklahoma State Department of Health, Oklahoma
- Kenneth R. Mead; Amy Feng, M.S.; Duane Hammond; Stan Shulman, 2012, "Expedient Methods for Surge Airborne Isolation within Healthcare Settings during Response to a Natural or Manmade Epidemic", NIOSH
- Miller, S. L.; Clements, N.; Elliott, S. A.; Subhash, S. S.; Eagan, A.; Radonovich, L. J., 2017, "Implementing a negative-pressure isolation ward for a surge in airborne infectious patients.", American journal of infection control, 45(6), p.652-659
- Minnesota Department of Health, 2010, "Airborne Infectious Disease Management: Methods for temporary Negative Pressure Isolation", Minnesota
- Minnesota Department of Health, 2020, "Guidelines for Temporary Negative Pressure Isolation Rooms", USA
- Mousavi, E. S.; Pollitt, K. J. G.; Sherman, J.; Martinello, R. A., 2020, "Performance analysis of portable HEPA filters and temporary plastic anterooms on the spread of surrogate coronavirus", Building and environment, 183, p.107186
- Park, J. Y.; Sung, M., 2015, "A study on the contaminant dispersion from isolation ward under abnormal operation of facilities", Energy procedia, 78, p.1239-1244
- Robert D. Booth; LT.Samantha J. Ponce; Gregory J. Corso; CAPT. Shelley K. Perkins, 2021, "Current/Updated Health Care Facilities Ventilation Controls and Guidelines for Management of Patients with Suspected or Confirmed SARS-CoV-2 (COVID-19)", ASHE, USA
- Shruti Hegde; Kyeong T. Min; James Moore; Philip Lundrigan; Neal Patwari; Scott Collingwood; Alfred Balch; Kerry E. Kelly, 2020, "Indoor household particulate matter measurements using a network of low-cost sensors.", Aerosol and Air Quality Research 20.2, p.381-394
- Weili Liu; Junfeng Zhang; Jamal H. Hashim; Juliana Jalaludin; Zailina Hashim; Bernard D. Goldstein, 2003, "Mosquito coil emissions and health implications", Environmental Health Perspectives, September, p.1459

접수 : 2022년 11월 16일
1차 심사완료 : 2022년 11월 24일
게재확정일자 : 2022년 11월 24일
3인 익명 심사 필