기획 집중

의료시설에서의 감염과 환기

MERS나 SARS와 같은 의료시설 내에서의 감염과 이를 제어하기 위한 환기 방식을 사례를 들어 소개한다.

성민기
세종대학교
건축공학과 교수
mksung@sejong.ac.kr

머리말

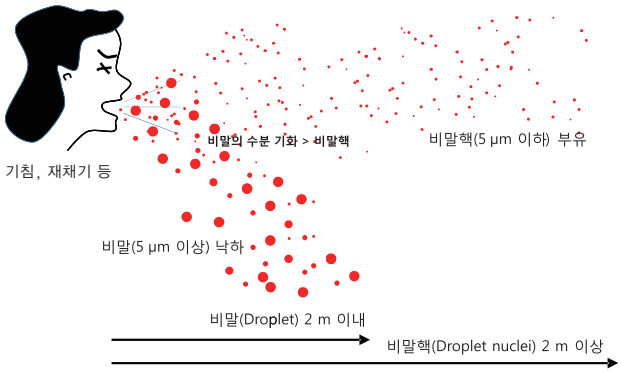
4년 전 중동지역에서 시작된 호흡기 감염병인 MERS(Middle East Respiratory Syndrome)는 우리나라에서도 2015년 5월 중동 여행에서 돌아온 한 MERS 감염환자에 의하여 완전 종식이 선언된 같은 해 12월까지 186명이라는 감염자와 1만 6천여 명의 격리자가 발생하는 등 사회적, 경제적으로 커다란 피해를 가져왔다. 특히 MERS는 대부분 병원에서 진료를 받거나 입원한 환자를 통해 감염이 확산된 것으로 나타나 병원 내에서 일어나는 진료행위와 더불어 의료시설의 실내 환경이 감염 확산의 원인 중 하나로서 주목을 받고 있다. 일부에서는 1차 감염환자를 통해 감염이 확산된 첫 번째 병원이 적절한 환기설비를 갖추고 있지 않아 36명이라는 많은 감염자를 발생시켰다고 추정하고 있다. 이와 같은 원내 감염의 문제는 이미 오래전부터 병원 내부에서 지속적으로 발생해 오고 있었고 이를 해결하기 위한 의료계의 노력이 있어 왔으나, MERS와 같은 집단 감염이 사회적 이슈가 되면서 원내 감염의 문제를 병원의 환기설비의 관점에서 다시 한 번 검토할 필요가 생겼다.

본고에서는 의료시설에서의 공기감염 문제를 살펴보고 환기설비 등

을 통한 올바른 감염 제어에 관한 방법을 사례 위주로 살펴보고자 한다.

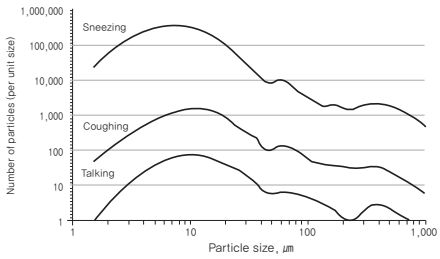
의료시설에서의 감염문제

MERS는 WHO의 역학조사 결과 공기가 아닌 비말에 의해 전파되는 호흡기 전염병으로 알려져 있다. 그러나 아직 짧은 역사만큼이나 감염경로나 병리학적 특성 등에 대하여 명확한 규명이 이루어지지 않고 있다. 일반적으로 감염병의 전파 방식은 크게 접촉(contact), 비말(droplet), 공기(airborne)로 나눌 수 있는데, 접촉감염은 감염자나 감염자로부터의 분비물을 직접 접촉하여 감염이 전파되는 방식이고, 비말감염은 **그림 1**과 같이 환자의 기침, 재채기, 그리고 호흡기관의 진료 시 환자의 호흡기를 통해 공기 중으로 유출되는 비교적 큰 입자(5 μm 이상)에 의해 전파되는 방식이다. 비말은 비교적 무겁기 때문에 중력에 의해서 약 2 m 이내에 바닥으로 떨어져 전파 거리가 짧은 것으로 알려져 있으나 일부 연구자들은 **그림 2**와 같이 공기의 흐름이 있는 환경에서는 비교적 큰 입자인 비말 또한 보다 넓은 범위로 확산될 수 있다고 보고하고 있다. 비말에 의해 전파되는 대표적인 호흡기 감염병으로는 2003년 홍콩을 중심으로 중국, 캐나다 등지에 전파되었던 SARS와 2009년 전 세계에 유행하였던 H1N1 신형 인플루엔자를 들 수 있다. 그러나 SARS나 H1N1 인플루엔자의 전파 경로에 관해서는 비말 이외에 공기를 통해서 감염을 일으킬 수 있다는 연구결과도 있었는데, 공기감염은 비말보다 작은 비말핵(droplet nuclei, 5 μm 이하)에 의해 전파되는 방식이다. 비말핵은 비말과 마찬가지로 호흡기관의 진료나 기침, 재채기 등을 통해 공기로 직

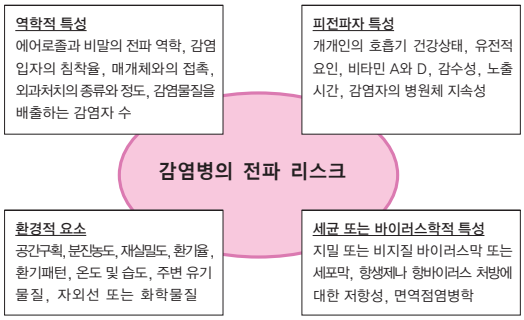


[그림 1] 비말(droplet)과 비말핵(droplet nuclei)의 도달 거리

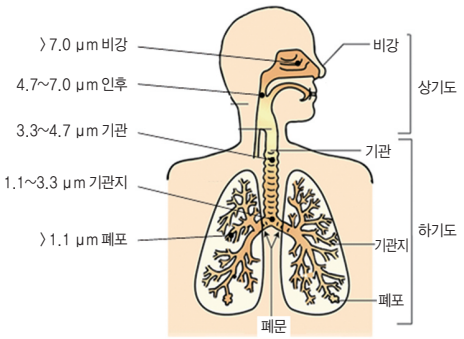
[그림 2] 기침에 의한 입자의 확산(Yomiuri, 2008)



[그림 3] 재채기, 기침, 말하기 시 유출입자의 입경분포 (Duguid, 1945)



[그림 4] 감염병의 전파 리스크에 영향을 미치는 요소들 (ASHRAE, 2013)



[그림 5] 입경별 호흡기의 흡착위치

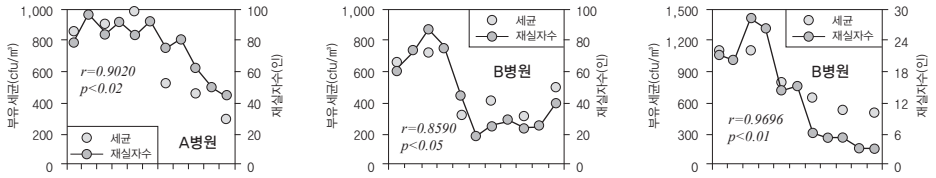
접 유출되거나 함께 유출된 비말의 수분이 급속히 증발하여 작은 비말핵의 형태로 바뀔 수 있다(**그림 3**). 이러한 비말핵은 중력의 영향을 적게 받아 공기를 타고 멀리까지 전파될 수 있어 접촉감염이나 비말감염과 달리 의료 차원의 대책으로는 예방하기가 어렵다.

감염병의 전파경로와 관련해서는 이러한 환경적인 요인뿐만 아니라 역학적, 병리학적 특성 또한 영향을 미치게 되는데 이러한 감염병의 전파에 영향을 미치는 요소들을 **그림 4**에 표시하였다. 이 중 비말이나 비말핵의 입경과 관련된 감염입자의 침착율과 관련해서는 **그림 5**와 같이 호흡기 내의 깊이에 따라 비말이나 비말핵의 침착 위치가 다르고 이러한 병원균에 의해 발병하는 수용체의 위치가 다르기 때문에 비말감염 또는 공기감염으로 구분하기도 한다.

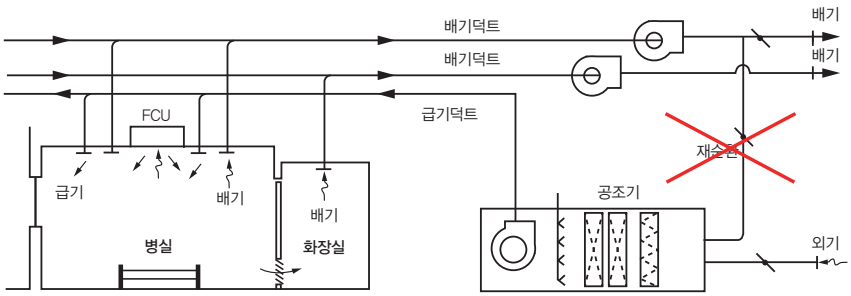
앞서 살펴본 바와 같이 원내 감염 중 제어하기 어려운 형태가 비말감염과 공기감염인데, 그 원인 중의 하나는 감염원인 감염자가 불특정인 경우가 많으며 이동하기 때문이다. **그림 6**은 병원 대합실에서 재실자 수와 부유세균의 농도변화를 추적한 결과인데 재실자 수가 증가함에 따라 부유세균의 농도도 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 트리아제(triage) 등을 통해 내원자 중 감염자를 구분해 내는 것이 가장 우선적으로 필요하고, 일단 확인되거나 의심되는 환자를 일반인들로부터 안전한 환경에 격리하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

환기에 의한 감염제어

병원은 규모에 따라 구성이 다르지만 크게 병동, 외래, 진료, 공급, 관리 부분으로 구성되어 있다. 병동은 간호단위로 입원환자를 대상으로 하는 부분이며 일반적으로 공조시스템 또한 내과, 외과 등 병동단위로 구성된다. 외래는 통원에 의해 진료를 받는 환자를 대상으로 하는 부분으로 외래진찰실, 응급실 등이 포함된다. 진료는 검사나 수술 등 실제 진료가 이루어지는 부분이며 일반적으로 실별로



[그림 6] 병원 대합실에서의 재실자 수와 부유세균 농도 변화(Yanagi, 2008)



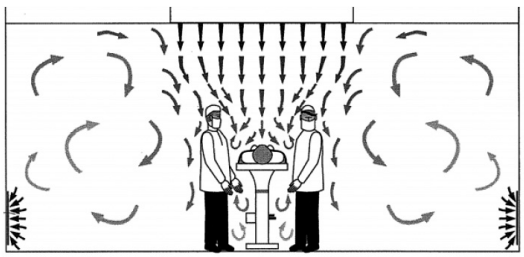
[그림 7] 병동의 바람직한 환기 방식

요구되는 환경이 달라 개별적인 공조구획이나 제어가 필요하게 된다.

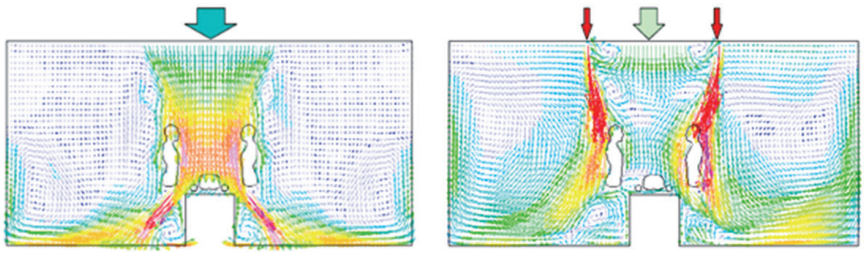
병동의 경우, 일반적으로 병동단위로 공조시스템을 구획하며 공기감염의 우려가 있는 내과병동에서는 **그림 7**과 같이 각 병실마다 FCU나 멀티에어컨으로 냉난방을 하고 환기는 별도로 각 병실 또는 몇 개의 병실을 묶어서 실시하여 병실간의 공기가 섞이지 않도록 한다. 이 때 병실에서 발생하는 오염물질의 원활한 배출을 위해 환기횟수가 외기도입량 기준으로 2회/h 이상, 총급기량 기준으로 6회/h 이상 되도록 권장하고 있다. 우리나라의 의료시설에 관한 시설 기준을 규정하고 있는 의료법 시행규칙에는 환기와 관련된 기준이 없으며, 2006년 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 제11조 4항에 신설된 환기기준에서 의료시설은 기계환기설비의 필요환기량으로서 36(m^3/h · 인)을 제시하고 있다. 의료법에 규정하고 있는 1인실의 최소면적인 6.3 m^2로 계산하면 약 2.4회/h가 되어 미국 및 일본의 기준과 유사하게 되나 실제로는 이 기준을 따르는 경우가 아직 많지 않다.

외과병동이나 일부 내과병동에서는 공조시스템 관리의 편의성 및 에너지 절감을 목적으로 순환식 중앙공조방식을 사용하기도 하는데, 이때 병실로부터 공조기로 돌아온 공기 중 일부가 다시 각 병실로 공급이 되기 때문에 한 병실에 사전에 확인되지 않은 감염환자가 있을 경우 다른 병실들로 공기 감염균이 확산될 우려가 있다. 이러한 위험을 최소화하기 위하여 중앙공조장치에 공기감염균을 제거할 수 있는 장치를 설치하기도 한다.

수술실의 경우, 보통 환부의 절개가 이루어지므로 절개된 환부에 감염이 일어나지 않도록 일정한 청정도를 유지하도록 하고 있다. 청정도 유지는 HEPA 필터를 통해 공기를 순환시키고 수술실 전체를 가압을 하여 다른 실로부터 오염된 공기가 유입되지 않도록 한다. 그러나 감염된 환자의 수술일 경우 반대로 절개 시 발생되는 에어로졸이 의료진이나 다른 실로 확산되지 않도록 음압을 유지해야 한다. **그림 8**은 수술실의 일반적인 공조방식을 나타내고 있으며 수술대의 청정도 확보를 위해 수술대 상부에 HEPA가 부착된 급기구를 통해 청정공기를 수술대로 공급하고 수술실 하단 벽부에 배기구를 설치하여 오염된 공기가 수술대로 재유입되지 않도록(클린룸과 같은 층류방식의 공조방식이 적용되고 있다) 일본(HEAS-02-2013)은 환자와 의료진



[그림 8] 층류방식의 수술실 공조(Swift, 2007)



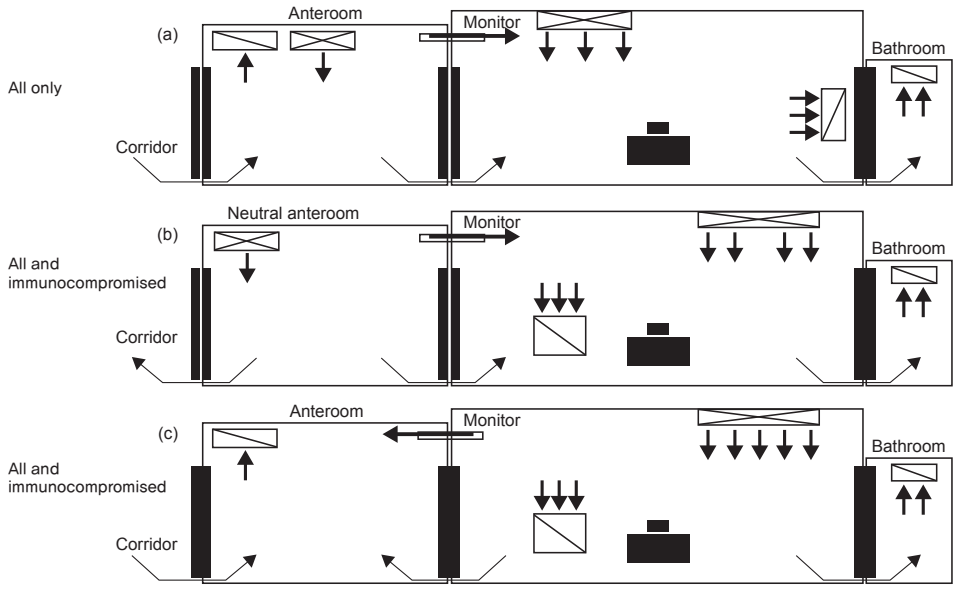
[그림 9] 에어커튼을 활용한 수술실 공조 개선 사례(Kajima, 2011)

을 위한 최소 외기도입량(3~5회/h)을 확보하고 수술환경의 청정도 확보를 위해 HEPA 필터를 이용한 순환 환기량 15회/h 이상을 권장하고 있으며, 미국(ASHRAE)은 최소 외기도입량 4회/h와 총환기량 20회/h 이상을 권장하고 있다. 근래 일부 연구에서는 **그림 9**와 같이 에어커튼을 활용하여 수술대의 청정도를 높이고 오염물질의 배출 효율을 높이고자 하는 노력을 하거나, 입자의 크기에 따라서 수술실 하부 벽에 있는 배기 방식이 비말핵과 같은 작은 입자의 배출에는 효과적이지 않다는 결과를 제시하기도 하였다.

앞장에서 살펴본 바와 같이 기본적으로 병원의 공조설비는 공기감염을 예방하기 위한 최소한의 시설을 갖추도록 하고 있으나 기본적으로는 감염환자나 감염이 의심되는 환자를 대상으로 하고 있지는 않아서 보다 안전한 감염제어 대책으로는 부족하다. 따라서 감염 확산의 우려가 있는 감염환자의 입원 및 진료를 위한 시설로 격리병동(Isolation Unit)을 두고 있다. 격리병동의 목적은 감염환자로부터 다른 환자 및 내원자, 의료진을 물리적으로 차단하여 감염 확산을 예방하는 것이다. 격리병동 중 공기감염의 우려가 있는 감염환자의 경우 병실의 공기가 다른 실로 유출되지 않도록 음압이 설정되어 있는 음압격리병동에 수용하도록 하고 있다.

음압격리병동은 공조설비의 급배기 풍량을 조절하여 감염환자가 입원하고 있는 병실을 상시 음압으로 유지시킴으로써 감염환자로부터 방출되는 감염균이 공기를 통해 다른 구역으로 유출되지 않도록 하고 있다. 공기감염을 일으키는 결핵 환자를 위한 시설과 관련된 USCDC(미국 질병관리본부) 가이드라인(2005)에 따르면 음압격리시설의 각 실간 차압은 2.5 Pa 이상이어야 하며, 환기 횟수는 12회/h(신축일 경우), 또는 6회/h(리모델링일 경우) 이상을 확보하도록 하고 있다. 이 중 외기도입량은 일반병실과 마찬가지로 2회/h 이상이 되도록 하고 있다. 음압을 형성시키는 가장 일반적인 방법은 음압병실의 급기량을 배기량보다 적게 설계하는 것이다. 실간 차압은 급배기 풍량 차이와 실간 누기 면적에 따라 형성되는데 비교적 출입문 등이 기밀한 생물안전실험실(Bio Safety Laboratory)과 달리 의료진의 출입이 잦아 누기 면적이 상대적으로 넓은 음압격리시설의 경우 2.5 Pa의 차압을 형성시키려면 일정한 급배기 풍량의 차이를 두어야 한다. 또한 음압격리시설에는 냉각코일에 감염균이 증식할 수 있어 FCU나 멀티에어컨과 같은 순환식 공조기가 사용되지 않는 것이 바람직하나, 만약 사용한다면 살균시스템을 부착하거나 환자가 바뀔 때마다 훈증 등을 통해 FCU나 멀티에어컨을 소독한 후 재이용하여야 한다.

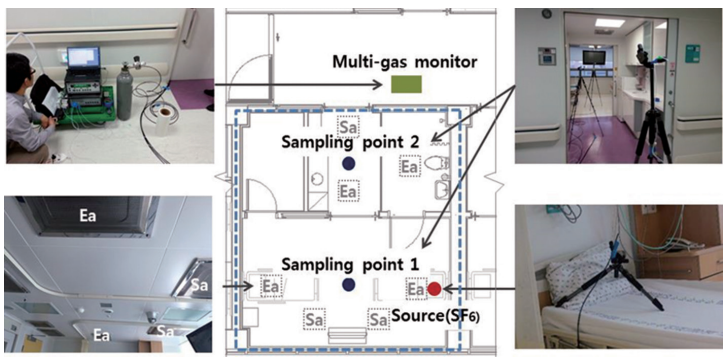
음압병실의 경우 의료진이 진료 및 검사를 위해 빈번하게 출입하게 되므로 출입문의 개폐가 많이 발생한다. 출입문이 닫혀 있을 때에는 음압병실의 음압이 유지되나 의료진이 출입하기 위하여 출입문이 열리면 순간적으로 실간 차압이 상쇄되어



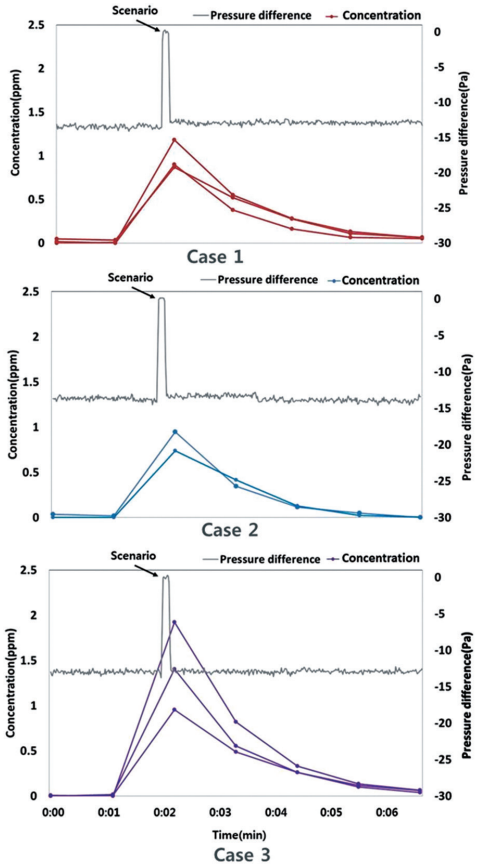
[그림 10] 음압격리병실과 전실의 공기 흐름

병실의 감염균이 외부로 유출될 수 있다. 또한 의료진의 출입에 따라 이러한 유출량이 많아질 수 있다. 전실이 음압병실과 일반구역과의 버퍼 역할을 하며 음압병실의 출입문이 닫힌 후에 전실 출입문이 열리는 인터록(interlock) 개폐방식을 적용하여 일반구역으로의 공기 유출을 최소화하고 있다. USCDC에서도 음압병실과 일반구역과의 사이에는 전실을 두어 의료진의 출입 시에도 일반구역으로의 감염균 유출을 최소화하도록 권고하고 있다(**그림 10**). 전실도 음압병실과 마찬가지로 일반구역보다 음압을 유지하도록 제어하여 일반구역→전실→음압병실로 공기가 흐르도록 하는 것이 일반적이지만 감염환자가 면역력이 떨어져 중복감염의 위험이 있는 경우, **그림 10**의 (b), (c)와 같이 전실을 중심으로 압력을 제어하여 일반구역의 공기가 음압병실로 유입되지 않도록 제어할 수도 있다.

전실이 있다 하더라도 의료진의 출입에 의해 환자로부터의 공기감염물질이 전실로 유출되는 양을 최소화할 필요도 있다. 이와 관련하여서는 **그림 11**과 같이 음압격리병실에서 의료진의 출입을 모사한 추적가스 실험(방종일, 2016)이나 **그림 13**과 같은 전산유체역학(CFD)를 이용한 해석(Park et al., 2015)도 이루어지고 있다. **그림 12**는 추적가스 실험을 통해 자동 슬라이딩 도어의 개폐, 의료진의



[그림 11] 음압격리병실에서의 추적가스 실험



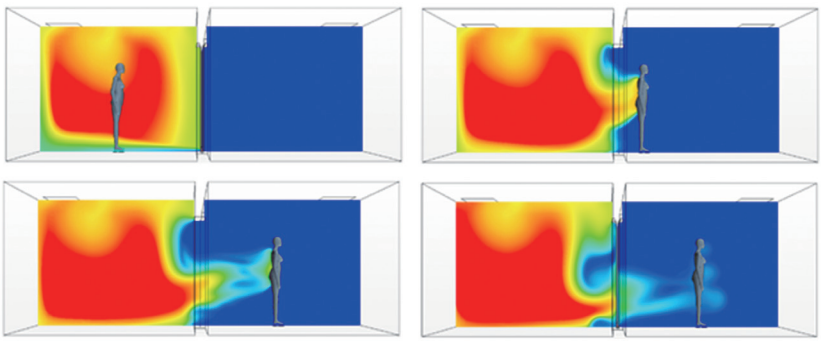
[그림 12] 의료진의 출입에 따른 음압격리병실로부터의 추적가스 유출

진입, 진출에 따른 음압격리병실로부터 전실로의 추적가스 유출량을 비교한 실험 결과를 나타내고 있다. 각각 의료진의 진출, 의료진의 진입, 슬라이딩 도어의 개폐 순으로 유출량이 많은 것으로 나타났으며 출입문의 개폐에 의해서만도 1.26% 정도가 전실로 유출되는 것으로 나타났다.

맺음말

보건복지부가 2006년부터 국비를 지원하여 2015년까지 전국 19개 주요 국공립 병원 및 대학병원에 국가지정 입원치료병동 설치가 완료되었고, 이중 17개 병동이 MERS 확진환자의 격리에 사용되었는데 MERS가 공기감염이 아니라 비말감염이라고 알려져 있음에도 음압격리병동에 격리한 것은 MERS의 감염경로 중 공기감염의 위험성을 배제할 수 없었기 때문이다. MERS 사태를 계기로 정부는 2015년에 추경예산을 마련하여 12개 신규 병원과 기존 국가지정 입원치료병동에 92개 병상을 추가로 설치하고 있으며, 일부 종합병원에서는 자체 예산으로 음압격리병실을 확충하고 있다.

머리말에서 살펴본 MERS의 감염 경로에 있어서는 감염균이 얼마나 멀리까지 갈 수 있느냐 뿐만 아니라 비말에 포함되어 있는 MERS-CoV 바이러스의 양과 감염력, 공기 중에서의 생존력, 그리고 감염을 일으키는 수용체의 위치 등이 병리학적으로 중요한 변수들이나 아직 명확히 밝혀지지 않았고



[그림 13] 수치해석에 의한 음압격리병실의 의료진 이동과 공기 유출

앞으로도 미지의 감염병은 계속 나타날 수 있다. 따라서 감염환자로부터 방출된 감염균이 최대한 공기를 통해 확산되지 않도록 제어해야 한다.

최근 보건복지부는 의료시설에서의 감염예방을 위한 환경개선 등의 내용을 담은 의료법 개정 검토에 들어갔다. 이러한 의료법 개정에 발맞추어 감염예방에 필수불가결한 환기기준의 제정 및 환기설비의 성능검증과 올바른 운영을 보장할 수 있는 제도 마련이 있어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. ASHRAE, 2013, HVAC Design Manual for Hospitals and Clinics Second Edition.
2. Duguid, J. F., 1945, The numbers and the sites of origin of the droplets expelled during expiratory activities. Edinburgh Med. J. 52, pp. 385-401.
3. HEAJ, 2013, HEAS-02-2013 병원설비설계 가이드라인(공조설비편).
4. Park, J. and Sung, M., 2015, Numerical Study on the Air Leakage from Negative Pressure Room, Cold Climate HVAC 2015.
5. Sung, M., Shin, C., Kim, H., and Kwon, S., 2013, The effect of staff movement on the dispersion of airborne infectious contaminants in negative pressure isolation wards, Proceedings of CLIMA 2013 Congress.
6. Swift, J., 2007, Air Distribution Strategy Impact on Operating Room Infection Control, Proceedings of CLIMA 2007.
7. USCDC, 2005, Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-Care Facilities.
8. Yanagi, U, et al., 2008, A Study on the Way of Maintenance of Sanitary Environment in Medical Facilities : Part2-The actual status and countermeasures of airborne microbe contamination in waiting rooms, Transactions of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, 141, pp. 9-17.
9. 방종일, 조성민, 성민기, 2016, 음압격리병실에서 출입문개폐와 인체이동에 따른 오염물질 유출량 검토, 2016 대한건축학회 춘계학술발표대회 학술집.
10. 보건복지부, 2015, 의료법 시행규칙.
11. 국토교통부, 2015, 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙.
12. 질병관리본부, 2011, 국가지정 입원치료(격리)병상 운영과 관리.