

공기감염 전파경로 연구현황

권 순 박 | 한국철도기술연구원 에코시스템연구실
선임연구원
E-mail : sbkwon@krri.re.kr

1. 서 론

감염환자의 재채기와 말하기 등을 통해 토출되는 감염성 부유미생물의 공기 중 확산은 피감염자에게 직접감염, 접촉감염 또는 공기감염을 통해 질병을 전파시킬 수 있다. 현재까지 토출 비말의 직접적 흡입 혹은 실내표면에 침착된 후 피감염자의 손이나 의류 등을 통한 접촉감염이 주요 감염경로로 알려져 있다. 그러나, 중증급성호흡기증후군(SARS), 신종플루 등 감염성 질환이 빠른속도로 전세계에 전파되어 대유행되면서 직접감염과 접촉감염 만으로는 그 전파속도를 설명하기 부족하며, 그동안 큰 관심이 되지 못했던 공기감염(airborne infection)의 위험성에 대한 논의가 활발하게 진행되고 있다(Olsen et al. 2003; Beggs 2003; Gupta et al. 2010, 2011; Morawska et al. 2009). 부유 미생물의 종류에 따라 공기 중에서 생존할 수 있는 종과 생존력을 상실하는 종으로 나누게 되며, 공기 중에서 장기간 생존할 수 있는 부유미생물은 실내에 지속적으로 부유하면서 피감염자의 호흡기에 감염시킬 수 있기 때문이다. 통상적으로 재채기 등을 통해 토출되는 비말은 공기 중에 토출되는 순간부터 상대습도에 따라 급격히 증발하여 크기가 작아지게 되며, 증발하지 않는 미생물은 그대로 공기 중에 부유하게 된다(Chao et al. 2009). 병원에서는 공기감

염을 차단하기 위해 격리환자실과 수술실의 경우 실내를 음압으로 유지하고, 최소환기량을 규정하여 공조시스템에 고효율필터(HEPA filter)를 적용하고 있다. 국내에서는 신종감염병 대유행 위협에 따른 적정 입원치료시설인 격리외래 및 격리중환자실을 대상으로 질병관리본부의 “국가지정 입원치료(격리)병상 운영과 관리(안)”와 “지역별 거점병원 운영과 관리(안)”에 대한 표준설계지침을 만들었다(질병관리본부 2011). 표준설계지침서에서는 격리외래 구역과 기존의 외래나 응급실 구역 사이에 차단시설을 설치하여 반드시 공간분리를 하여, 독립된 배기시설이나 배기장치를 설치하도록 되어 있다. 격리중환자실 내의 환기회수는 1시간에 12회 이상을 하고, 병실 내부는 전실보다 음압(음압차: 2.5pa 이상)으로 하고, 전실의 기존 중환자실에 비해 압(음압차: 2.5pa 이상)이 되어야 한다. 그리고 음압구역에서 실내공기 흐름 방향은 환자의 방향으로, 반면 양압구역에서는 환자로부터 멀어지는 방향으로 설정되어야 한다. 그러나 실제 환자에서 토출되는 비말의 거동특성을 반영한 병실의 환기 설계조건에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 공기감염 전파경로에 관한 외국의 연구사례와 본 연구팀에서 수행하고 있는 연구사례를 중심으로 소개하고자 한다.

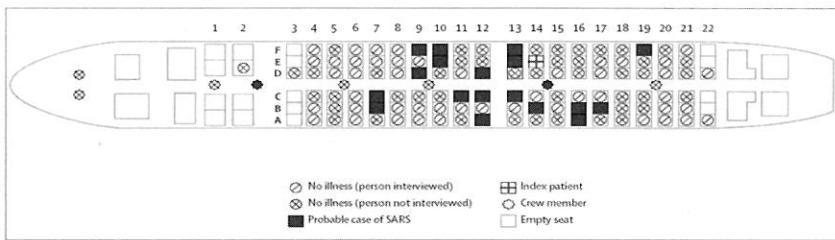


그림 1. 비행기 객실내 감염성 질환의 전파사례 (Olsen et al, 2003).

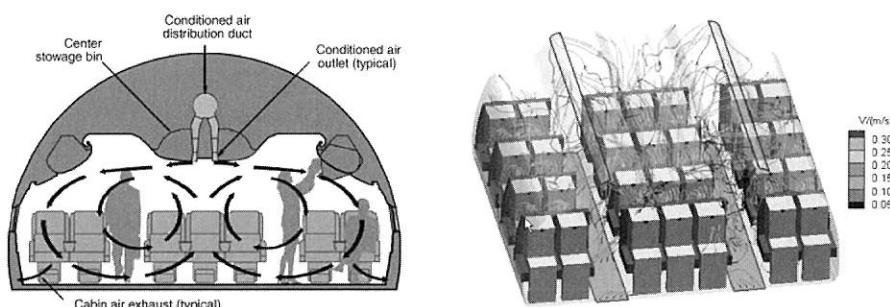


그림 2. 비행기 객실내 공기흐름 및 속도분포 (Zhang and Chen, 2007)

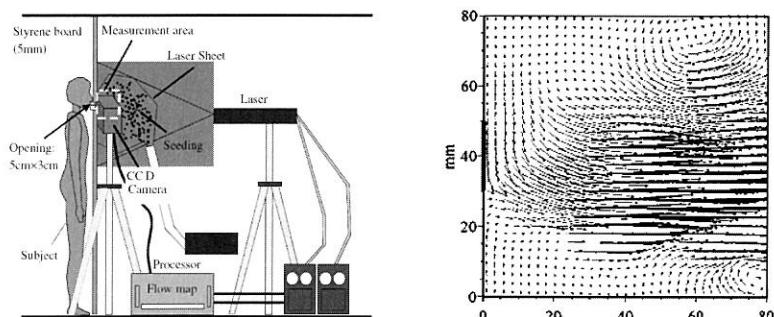


그림 3. 피시험자 재채기 챔버와 PIV센서를 이용한 유동패턴 가시화 (Zhu et al., 2006)

2. 국외 연구동향

홍콩에서 베이징으로 항하는 항공기내에서 코로나바이러스에 감염된 환자가 세시간의 비행시간동안 129명의 승객중 16명을 감염시켰던 사례를 공기감염 현상에 기반하여 분석한 연구결과(Olsen et

al., 2003)가 발표된 이후, 항공기내에서 감염전파에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

미국의 우수연구센터 가운데 한곳인 Airliner Cabin Environment Research (ACER)에서는 항공기내 실내환경에 관한 전반적인 연구를 수행하고 있는데, 그 중 항공기내 공조방식에 대한 감염전파 가능성

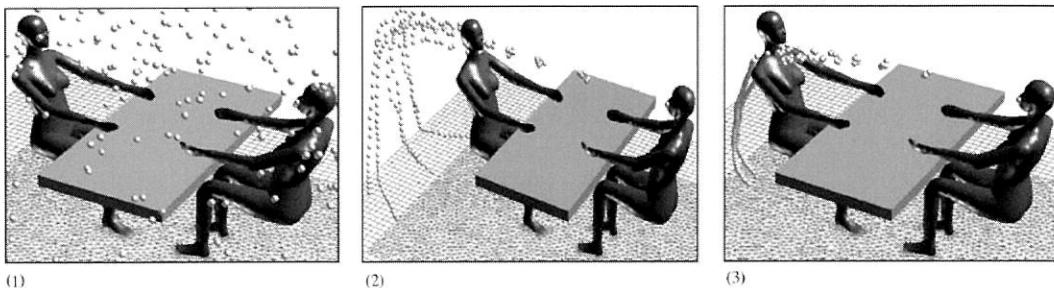


그림 4. 토출된 타액입자의 크기별 이동경로

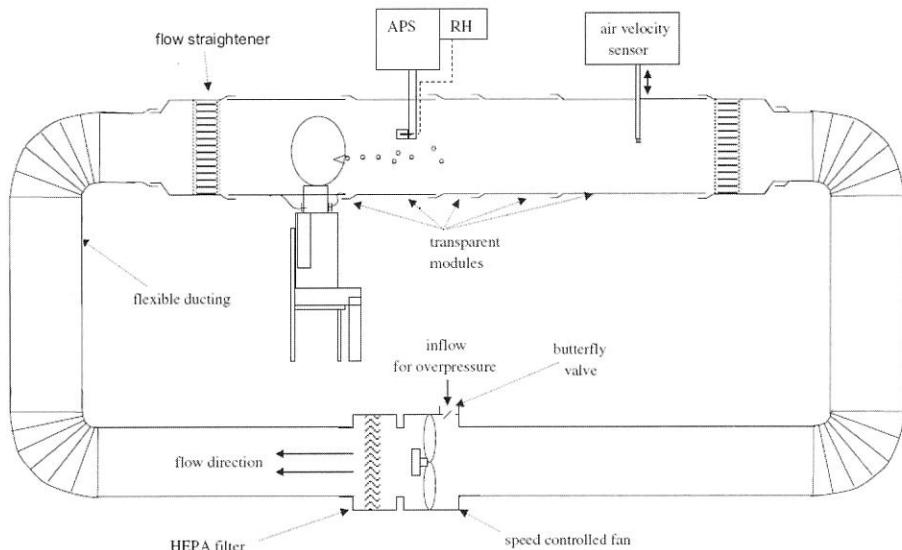
(1) $D = 30\mu\text{m}$ (2) $D=50\mu\text{m}$ (3) $D=100\mu\text{m}$ (Zhu et al., 2006)

그림 5. 인체토출 비말의 특성분포 평가를 위한 풍동시스템 (Morawska et al. 2009)

을 수치해석 기반의 연구를 수행하고 있다(Zhang and Chen, 2007).

일본 동경대학 생산기술연구소에서는 씨멀마네킨(thermal manikin)을 이용하여, 재실자의 호흡에 의한 유동변화를 PIV실험과 수치해석적 방법으로 연구하고 있으며, 그림 3은 피시험자의 실제 재채기 속도를 측정하기 위한 실험장치와 측정결과의 예를 보여주고 있다. 수치해석적 연구를 통해 토출비말의 입경에 따른 거동특성을 그림 4에 제시하였다.

호주 퀸스랜드 기술대학(Queensland University of Technology)에서는 호흡에 의해 발생하게 되는 입자의 크기에 대한 연구를 위해 EDIS (Expiratory droplet investigation system)을 이용하여 실제 호흡 및 기침 등에 의해 방출되는 입자를 측정하는 연구를 수행하고 있다. 그림 5는 실제 피시험자가 호흡 기를 풍동에 위치시켜 재채기 및 말하기를 수행하고 이때 발생하는 비말의 크기분포를 측정할 수 있는 시험장치도를 보여주고 있다.

3. 국내 연구동향

(1) 재채기 토출 특성 및 분석연구

미래창조과학부 휴먼인지환경사업의 일환으로 진행되고 있는 실내공간 에코청정화 원천기술개발(2009~2014, 연구단장 배귀남)의 2세부과제에서는 공기감염 예측기술개발을 주제로 연구가 진행되고 있다. 공기감염 예측기술개발을 위하여 인체토출부유미생물의 토출속도와 방향을 분석하였고, 실제 사람의 재채기를 모사할 수 있는 모사장치를 개발하였다. 재채기 속도의 측정을 위하여 particle image velocimetry (PIV) 장치를 그림 6과 같이 설치하여 피

시험자의 재채기시 유동을 가시화 하였고, 재채기 토출속도를 분석 제시하였다(Kwon et al., 2009).

재채기 토출 모사장치는 사람의 폐 크기의 압축용기에 공기를 압축하였다가, 분무장치(atomizer)를 통해 발생되는 액적과 혼합되어 일시에 토출되는 장치로 그림 7과 같이 구성되었으며, 출구부의 개방시간과 압축공기의 압력을 조절함으로써 토출 재채기의 속도를 제어할 수 있도록 구현하였다.

(2) 수치해석을 활용한 병원내 감염전파 특성 연구

통상적인 병원의 1인 중환자실을 대상으로 환기 조건에 따른 감염환자의 재채기 토출비말의 거동특

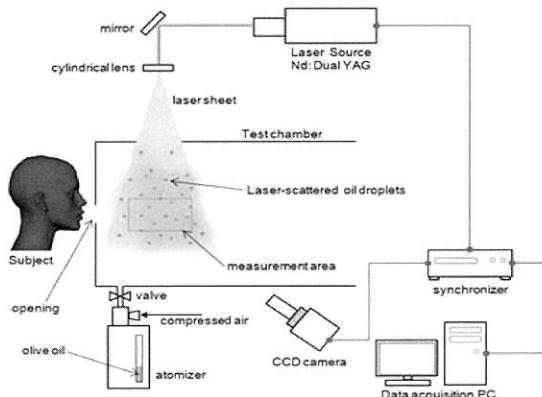


그림 6. 재채기 토출공기의 속도분포 측정방법 및 측정결과 (Kwon et al., 2009)

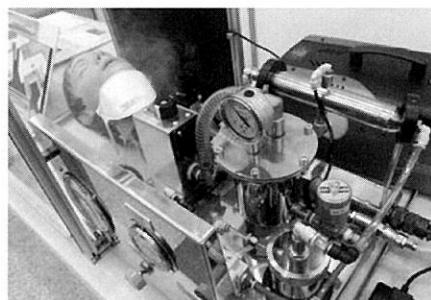
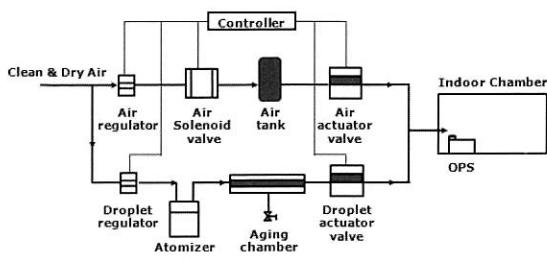
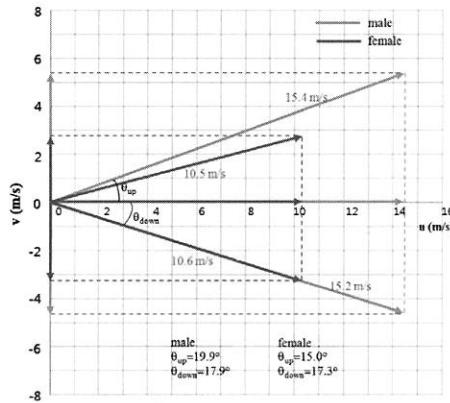


그림 7. 재채기 모사장치 구성과 실제 개발품 모습

성에 대한 수치해석적 연구가 수행되었다. 실제 병실을 대상으로 구조와 환기량을 검토하여 동일한 조건으로 유동해석이 수행되었고 토출비말의 거동 특성에 영향을 미칠 수 있도록 환기조건을 변경하여 총 세가지 환기방식에 대한 수치해석적 연구가 수행되었다. 그림 8은 해석대상 병실의 형상과 침대위 감염환자의 재채기에 따른 토출비말의 모습을 나타내고 있으며, 세가지 해석경우에 대한 급배기 조건을 보여주고 있다.

해석에 사용된 프로그램은

Ansys사의 CFX ver 14.0이며, 비정상상태해석을 통해 재채기 직후부터 약 600초 동안의 토출비말의 거동특성을 분석하였다.

환기조건에 따른 병실내 부유 입자의 저감특성은 그림 9에 제시하였는데, 해석시간동안 지수함수적으로 부유입자의 수가 감소하는 것을 알 수 있으며, 저감된 입자는 주로 벽면에 침적되어 제거되는 것으로 나타났다(그림 9). 각각의 환기조건에서 벽면에 가장 높은 침적량을 나타내는 경우가 천정중

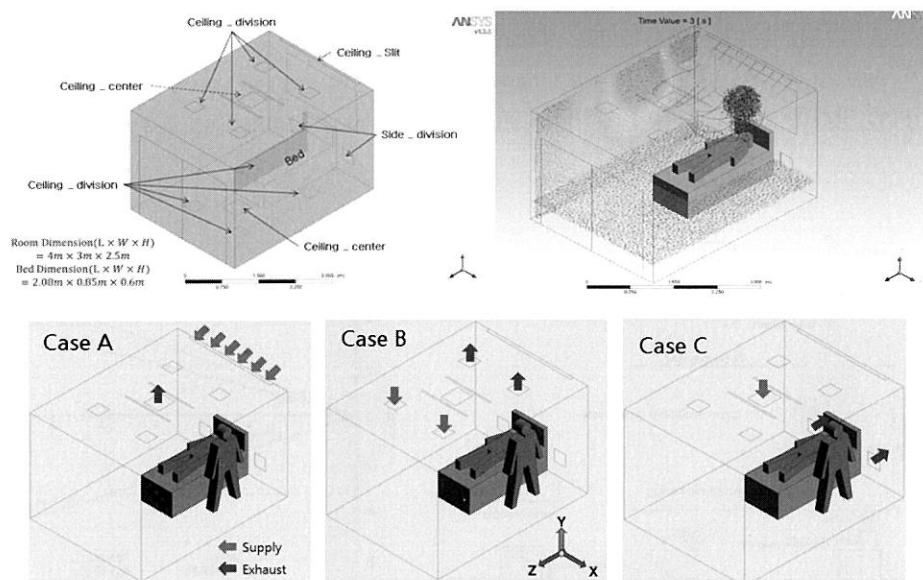


그림 8. 병원 1인실 수치해석 모델 및 해석 환기조건

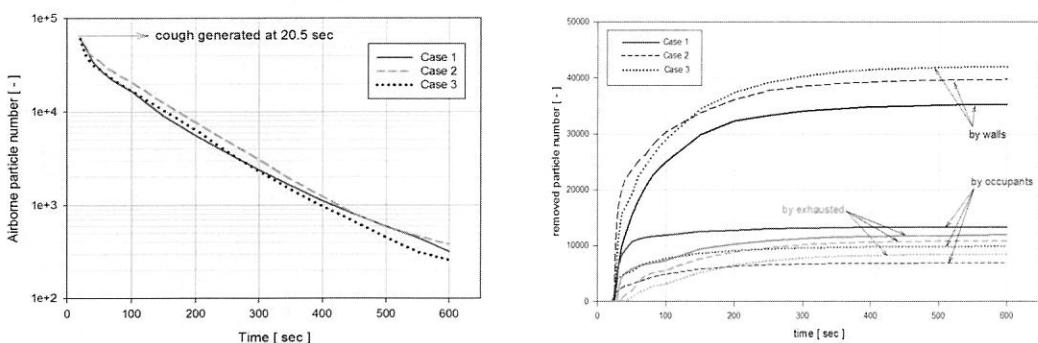


그림 9. 부유입자 감소특성 및 저감기작별 감소량

양에서 급기되어 침대 상단 측벽으로 배기되는 Case 3으로 나타났으며, 재실자의 몸에 침적되거나 배기구에 의하여 배기되는 총 입자량은 유사한 정도로 나타났다(송지한 등, 2012).

(3) 병원 환자간 감염전파 경로예측 연구

실제 병원에서의 주요 유해미생물에 대한 샘플링 및 분석연구 수행을 통해 병원내 환자간 감염전파 가능성을 분석하는 연구가 수행되었다. 병원내 유해 미생물 분석은 공기중 부유미생물과 의료진 및 환자가 자주 접촉하는 특정 표면에 대한 샘플링이 병행되어 수행되었으며, 공기중과 표면에서 공통으로 다재 내성(multidrug resistant) 박테리아인 A.Baumannii 가 검출되었으며, Baumannii 박테리아가 검출된 영역을 그림 10에 제시하였다. 또한, 환자의 몸에서

동일한균을 보유하고 있는 경우를 침상의 위치와 함께 나타내었다. 공기중균이 검출된 경우(빗금), 주변 침대 가드레일 혹은 의료기기 및 간호진 데스크 등 표면에서 검출된 경우(붉은색 박스), 감염환자의 위치(붉은색 원)를 병원 평면도에 함께 보여주고 있다. 환자간 교차감염과 공기전파를 통한 감염확산 등의 명확한 상관관계를 파악하기는 힘들지만, 향후 추가적인 분석과 수치해석적 연구를 통해 감염경로에 대한 종합적 이해가 가능할 것으로 기대한다.

특히, 그림 11에 제시한 수치해석적 모델을 활용할 경우, 병원내 특정 지점의 오염원이 병원환경에 따라 어떻게 확산되는지를 파악할 수 있고 병원내 기류분포 경향을 파악할 수 있어 감염확산 경로를 파악하는 실마리를 제공할 수 있을 것이다(권순박 등, 2013).

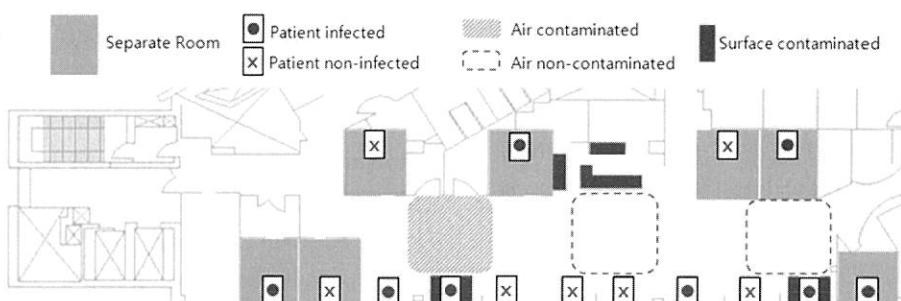


그림 10. A.Baumannii 박테리아에 의한 병원내 감염환자, 표면감염, 공기감염 위치도

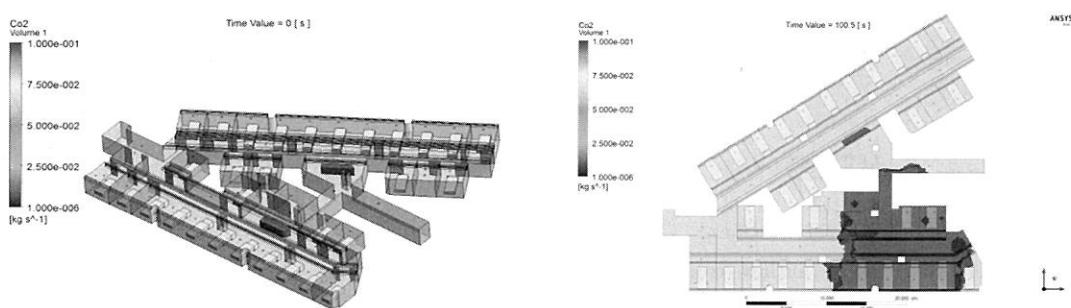


그림 11. 병원 수치해석 모델 및 시간에 따른 오염물질 확산 경향

4. 결 론

지구온난화와 기후변화로 인하여 인류를 위협하는 새로운 감염성 질환의 발생 가능성이 높아지고 있으나, 현재까지 감염성 질환의 전파경로 혹은 확산 경로를 체계적으로 이해하고 대처하는 것은 거의 불가능한 상황이다. 새로운 신종바이러스의 출현이나 항생제로 막을 수 없는 슈퍼박테리아가 지속적으로 나타나고 있기 때문에 이에 대한 피해를 최소화하고 사전에 예방하기 위한 다각도의 기술개발이 요구되고 있다. 공기를 매개로 하는 공기감염에 대한 정확한 이해와 이를 차단하거나 예방할 수 있는 기술의 개발이 전세계적으로 진행되고 있으며 국내에서도 미래창조과학부 R&D사업의 일환으로 실내 공간 에코청정화 원천기술 개발이 수행되고 있다. 본 보고서에서는 현재까지 진행된 국내외 공기감염 관련 연구사례를 제시하였고, 실제 병원 샘플링을 통해 감염환자간 전파경로를 예측할 수 있는 방안과 지금까지의 연구결과를 요약하여 제시하였다. 보다 명확한 공기감염 전파 경로의 예측을 위해서는 의학적 지식과 공학적 지식이 결합된 융복합연구가 성공적으로 수행되어야 하며, 공기감염 유해 미생물의 확산을 조기에 차단할 수 있는 병원공조 시스템 개발이 향후 주요한 연구주제가 될 것으로 전망된다.

감사의 글

이 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 휴먼인지환경사업본부-신기술융합형 성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012K001373)

- 참고문헌 -

- Gupta, J.K., Lin, C.H., Chen, Q., 2010, Characterizing exhaled airflow from breathing and talking. *Indoor Air* 2010, 20, 31-39
- Gupta, J.K., Lin, C.H., Chen, Q., 2011, Transport of exhalatory droplets in an aircraft cabin. *Indoor Air* 2011, 21, 3-11
- Kwon, S.B., Park, J.H., Jang, J.Y., Cho, Y.M., Park, D.S., Kim, C.S., Bae, G.W., Jang, A., 2012, Study on the initial velocity distribution of exhaled air from coughing and speaking. *Chemosphere*, 87, 1260-1264
- Morawska, L., Johnson, G.R., Ristovski, Z.D., Hargreaves, M., Mengersen, K., Corbett, S., Chao, C.Y.H., Li, Y., Katoshevski, D., 2009, Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory trace during expiratory activities. *J. Aerosol Sci.*, 40, 256-269
- Olsen, S.J., Chang, H.L., Cheung, T.Y.Y., Tang, A.F.Y., Fisk, T.L., Ooi, S.P.L., Kuo, H.W., Jiang, D.D.S., Chen, K.T., Lando, J., Hsu, K.H., Chen, T.J., Dowell, S.F., 2003, Transmission of the severe acute respiratory syndrome on aircraft. *New Eng. J. Med.*, 349, 2416-2422
- Zhang T., Chen Qingyan, 2007, Novel air distribution systems for commercial aircraft cabins, *Building and Environment* 42, 1675-1684
- Zhu S., Kato S., Yang J.H. 2006, Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment, *Building and Environment* 41, 1691-1702
- 권순박, 송지한, 김민해, 조영민, 박덕신, 2013, 수치해석을 활용한 병원내 공기중 오염물질 전파 연구, 한국전산유체공학회 초록집, 159
- 송지한, 장재연, 조영민, 박덕신, 권순박, 2012. 환기방식에 따른 병실내 재채기 토출입자의 침적 특성에 대한 수치해석적 연구, 한국대기환경학회 초록집, PB12
- 질병관리본부., 2011, 국가지정 입원치료(격리) 병상 운영과 관리(안), 지역별 거점병원 운영과 관리(안), 질병관리본부