

## 국내외 공기감염 분야 연구동향

권 순 박\* · 김 창 수<sup>1)</sup>

한국철도기술연구원 철도환경연구실, <sup>1)</sup>연세대학교 의과대학 예방의학과  
(2010년 4월 26일 투고; 2010년 6월 14일 수정; 2010년 6월 21일 게재확정)

### Review of Recent Studies on the Airborne Infection

Soon-Bark Kwon\* · Chang-Soo Kim<sup>1)</sup>

*Railroad Environment Research Department, Korea Railroad Research Institute (KRRI)*

<sup>1)</sup>*Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Yonsei University*

(Received 26 April 2010; received in revised form 14 June 2010; accepted 21 June 2010)

#### Abstract

Several studies have suggested the possibility of airborne transmission of infectious diseases such as tuberculosis, pandemic influenza. because the number of patients increases explosively, if infectious disease had a high basic reproduction number, pharmaceutical interventions such as vaccination, chemoprophylaxis in the early stage of epidemic. Thus, non-pharmaceutical interventions such as mask-wearing, installing air cleaners, school closure are important to control and prevent the infectious diseases. However, the current technology on the mask, air cleaning, ventilation, and etc., seems to be not originated from the understanding of infection via airborne transmission. It is important to estimate the aerodynamic behavior of saliva droplets by coughing or speaking in order to understand the phenomena of airborne infection. In addition, the prediction of transmission of infectious diseases through the air is critical to prevent or minimize the damage of infection. In this review, we reviewed the recent studies on the airborne infection by focusing on the aerodynamic characteristics of saliva droplets and modeling of airborne transmission.

**Keywords :** Airborne infection, Infectious disease, Disease transmission, Bioaerosols

#### 1. 서 론

2009년 전 세계적으로 유행하면서 100여개 국가 이상에서 800명 이상의 사망자가 보고된 신종플루

전파를 계기로, 공기감염에 대한 관심이 급속히 증대되었다. 중증급성호흡기증후군인 사스-코로나 바이러스(SARS coronavirus; SARS CoV)는 2002년 11월에서 2003년 7월까지 유행하여 8,098명의 감염자가 발생하고 774명이 사망한 것으로 보고되고 있다 (Centers for Disease Control and Prevention: CDC, 미국질병관리본부). 세계보건기구(World Health Organi-

---

\* Corresponding author.  
Tel : +82-31-460-5375, E-mail : sbkwon@krii.re.kr

zation: WHO)에 따르면, 최근 발병한 신종인플루엔자 바이러스(novel swine-origin influenza A; H1N1)의 경우 신형 바이러스로 2010년 3월 12일 까지 전 세계 213개국에서 감염자가 확인되었으며, 사망자가 16,713명으로 공식 집계하였다(WHO Pandemic (H1N1) 2009 - update 91). 짧은 기간에 SARS CoV, H1N1과 같은 바이러스는 세계 전역에 전파되었는데, 이는 교통수단의 발전과 공기감염을 통한 전파 가능성을 보여주고 있다. 병원체의 전파경로는 직접적인 전파와 간접적 방식에 의한 전파로 구분할 수 있으며, 공기감염은 공기를 매개로한 간접적 전파방식으로 구분될 수 있다. 공기감염으로 전파되는 질병에는 결핵, 인플루엔자, 풍진 등이 있는데, 호흡기 계통의 질환이 대부분이다. 특히 결핵의 경우 전 세계적으로 17억 명의 환자가 있고, 매년 300만 명의 사망자가 발생하는 것으로 추정되고 있다. 1990년대의 WHO의 보고에 의하면 해마다 800만 명의 환자가 새로 발생하는 것으로 보고하였다. SARS, H1N1 등의 급속한 전파에 공기감염 가능성이 제기된 이후, 공기감염에 대한 관심이 증가하고 있는 경향을 보이고 있다. 하지만, 현재까지 전 세계 공기감염과 관련된 연구결과는 극히 미미한 수준에 그치고 있는 실정이다. 특히, 우리나라는 공기감염과 가장 밀접한 관련이 있는 결핵의 유행률이 최근 젊은 층에서 지속적으로 높은 것으로 조사되고 있으며, 또한, 향후 조류독감을 비롯한 인플루엔자 재유행의 가능성이 높을 것으로 예측되고 있어, 공기감염에 대한 역학조사 및 예방대책의 수립이 필요할 것으로 판단된다.

본 총설에서는 사람간 질병전파의 주요 경로 중 하나인 공기를 통한 감염과 관련하여 공기감염의 정의, 인체토출 비말특성분석에 대한 국외연구 사례 및 국내연구 동향, 공기감염 역학연구 동향 및 질병전파 모델링에 대해 기술하고자 한다. 공기감염 분야 연구에 대한 최근 급격히 증가하고 있는 전 세계적 관심에 비하여, 관련 기술 분야의 수준은 국외에서도 기초적인 수준에 머물러 있는 실정이다. 국내에서는 인체토출 비말특성에 대한 실험적 연구(한국철도기술연구원)와 질병전파 모델링 연구(연세대학교)를 중심으로 최근 연구가 진행되고 있으며 본 총설에서 국외사례 소개와 함께 국내연구 동향으로 소개하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 질병전파 및 공기감염 현상

질병전파는 병원체가 인간 혹은 동물에게 감염되는 경로에 따라 일반적으로 직접전파(direct transmission)와 간접전파(indirect transmission)의 두 가지로 분류할 수 있다. 직접전파는 병원체가 중간 매개체가 없이 전파되는 것을 의미하며 비말(droplet) 감염이 대표적인 예이다. 간접전파는 공기, 물 등과 같은 중간 매개체를 거친 후 전파되는 것을 의미한다. 그러나 비말이 직접적으로 전파되는 직접전파의 경우에도 근접거리의 공기를 통해 비말의 공기역학적 이동으로 전파될 경우, 넓은 의미에서 공기를 통한 간접전파로 볼 수도 있다. 비말감염이란 직경  $5\mu\text{m}$  이상의 입자에 부착된 병원체에 의해 감염이 발생하는 것으로, 기침, 재채기, 대화 등의 일상적인 생활 뿐 아니라, 감염성 질환자를 대상으로 한 기관지경 검사 등의 의료적인 처치 도중에 발생한 비말에 의해 일어난다. 대개 비말은 입자가 커서 무겁기 때문에 단거리 내에 퍼지는 특성을 가지게 된다. 공기역학적 직경이  $10\mu\text{m}$ 인 구형 비말의 경우 중력침강 속도는 약  $0.3\text{cm/s}$ 로 높이  $1.5\text{m}$  지점에서 토출될 경우 바닥까지 침강하는데 약 8.3시간이 걸린다(Hinds, 1999). 비말의 전파는 주위 사람의 상기도 점막에 직접 노출되는 경우와 비말이 묻어 있는 물체에 접촉한 사람이 감염되는 경우로 나눌 수 있다. 일반적인 감염성 질환 대부분이 비말감염에 해당되며, 인플루엔자 바이러스, 머프스(볼거리) 바이러스, 풍진바이러스, 마이코플라스마, 디프테리아균, 용혈성 연쇄구균, 백일해균 등이 대표적인 경우이다.

간접전파는 병원체를 포함하고 있는 비말핵(droplet nuclei)이나 먼지를 매개체로 부유하는 비말입자에 의해 이루어진다. 비말핵은 기침이나 재채기를 통해 튀어나온 비말이 시간이 지남에 따라 수분성분이 증발되고 남아있는 직경  $5\mu\text{m}$ 이하의 입자를 의미하는데, 기침, 재채기, 대화중에 감염된 사람의 호흡기를 통해 배출되며 공기 중에 몇 시간 혹은 수일간 생존이 가능하다. 일반적으로  $5\mu\text{m}$ 보다 큰 크기를 가진 먼지는 신체의 호흡기에 걸려지지만  $5\mu\text{m}$  이하의 미세입자는 호흡기 깊숙이 침투하는 것으로 알려져 있으며, 크기가 작을수록 공기 중 부유시간이 길어지고 호흡시 폐포 깊숙이 침투할 수 있다. 간접

전파에 의한 대표적인 감염성 질환으로는 중증급성 호흡기증후군, 결핵, 홍역, 수두, 대상포진 등이 있다.

공기감염(airborne transmission)은 간접전파 중에서 공기를 매개체로 이루어지는 감염을 의미하며, 통상적으로 환자의 비말(droplet)을 통해서 이루어지는 직접전파는 일반적으로 제외 되고 있지만, 앞서 언급하였듯이 비말의 직접적 전파의 경우에도 대다수의 경우 짧은 거리일지라도 공기를 매개체로 전파되기 때문에 향후 지속적인 논의를 통해 공기감염의 확장된 정의가 필요한 부분이다. 공기 자체는 미생물의 증식을 일으킬 수 있는 능력이 없기 때문에 병원체가 수분이나 영양분의 공급이 없이도 생존이 가능한 기간 동안 인체의 호흡기 내로 침투할 때에 감염이 가능하다. 비말 내에서 미생물의 생존 시간은 미생물의 종류에 따라 다르며, 일반적으로 코로나 바이러스의 경우 비말 내에서 3시간, 코로나 바이러스의 변종 바이러스는 24시간까지 생존이 가능하다고 추정하고 있다. 그러나 일반적으로 미생물의 생존 시간은 주변 환경의 온도와 습도에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다(Tang, 2009).

2.2 공기감염 예측기술 연구동향

국의 공기감염 관련분야 연구는 감염경로 연구, 인체토출 비말의 공기역학적 특성 연구, 항공기내 공기감염 전파사태연구 및 공기유동 분석연구, 실내 공간 환기에 의한 감염성물질 전파특성 연구 등의 주제로 진행되고 있다. 홍콩대학의 Li Yuguo교수는 직접접촉(direct contact), 간접접촉(indirect contact), 비말(droplet spray-borne)과 공기(airborne)의 4가지 경로를 사람 대 사람간 감염을 일으키는 주요 경로로 정의하였다(Fig. 1).

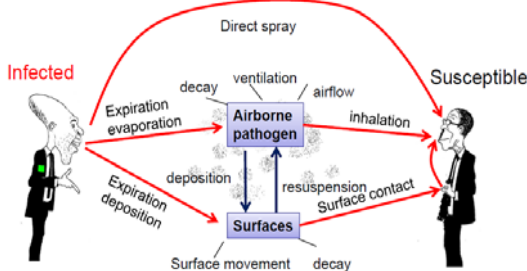


Fig. 1. Li 교수가 제시한 사람 대 사람간 주요 감염경로.

감염자와 피감염자의 감염은 비말의 직접적인 전달(direct spray)에 의한 경우와 토출된 비말이 공기 중에서 부유하면서 피감염자의 호흡에 의해 유입되는 경우(airborne pathogen), 그리고 비말이 침착되어 표면에 붙어 있다가 피감염자의 손 등을 통해 간접적으로 유입되는 경우(surfaces)로 구분하였다. 이러한 감염경로는 토출비말의 공기역학적 특성(초기속도, 입경분포, 개수농도)에 따라 결정되는데, 입경이 상대적으로 큰 비말은 중력침강에 의해 바닥으로 침착하고 입경이 작은 비말은 공기 중에서 장시간 부유할 수 있다. Li교수는 근접거리 일지라도 직접 감염의 가능성보다는 공기감염이 중요한 메커니즘으로 작동할 것이라고 주장하고 있다(Li et al., 2004; Li, 2009).

토출비말의 공기역학적 특성을 파악하기 위해, 피시험자의 재채기나 대화를 통해 실제 배출되는 비말의 속도분포 측정, 입경분포 측정 등의 실험적 연구가 수행되고 있다. Li 교수팀과 같은 대학 Chao 교수팀, 일본 도쿄대학 Kato 교수팀, 미국 시라큐즈 대학 Zhang 교수팀에서는 토출비말의 초기속도 측정을 위해 PIV(particle image velocimetry)를 이용한 실험적 연구를 수행하였다(Chao et al., 2009; Zhu et al., 2006; Liu et al., 2007). PIV실험은 피시험자의 재채기나 대화를 통해 발생하는 기류속도를 연동된 레이저면(laser sheet)과 CCD카메라를 활용해 입자의 궤적을 분석하여 속도분포를 추출해내는 방식이다.

호주 QUT대학의 Morawska 교수팀은 풍동장치를 활용하여 토출비말의 입경분포 측정연구를 수행하였다(Morawska et al., 2009). EDIS(expiratory droplet investigation system)으로 명명되어진 풍동장치는 공기순환식으로 제작되었으며, 피시험자가 풍동 내에서 직접 재채기나 대화 등을 수행하고, 실시간 입경분포 측정 장비인 APS(aerodynamic particle sizer)를 이용하여 입경분포를 측정하는 시스템이다(Fig. 2).

미국 퍼듀대학의 Chen 교수팀과 일리노이대학의 Zhang 교수팀에서는 항공기 객실내 공기감염 연구를 수행하고 있다. 객실내 승객간 SARS 감염사태를 보고하였으며, 실험과 수치해석 등을 통해 환기특성에 따른 좌석별 공기유동 특성연구를 수행하고 있다(Mazumdar and Chen, 2009; Yan et al., 2009; Olsen et al., 2003; Gupta et al., 2009; Gupta et al., 2010). 홍콩대학교에서는 병원시설에서 환자에 의해 발생되

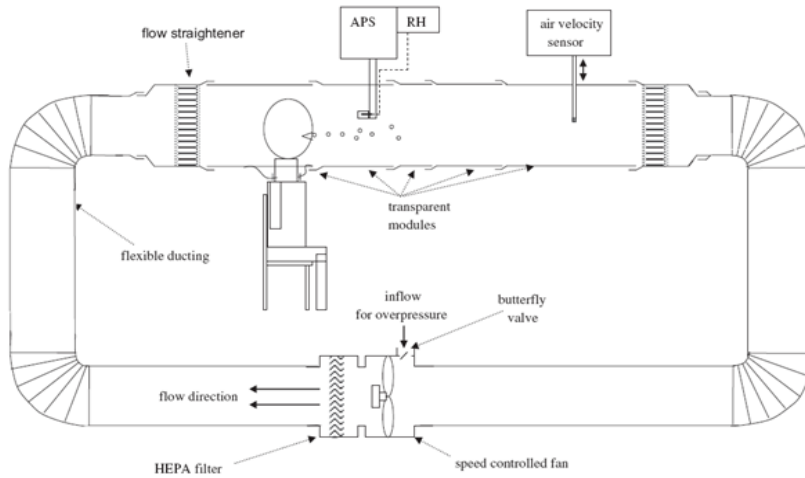


Fig. 2. Morawska 교수팀의 풍동장치(EDIS).

는 바이러스가 환기에 의해 공기감염되는 가능경로를 수치 해석하였다(Qian et al, 2008). Mazumdar and Chen (2009)은 기침에 의해 토출되는 바이러스가 호흡과 대화를 통해 사람간 감염을 야기시킬 수 있다고 보고하였다. 한국철도기술연구원에서는 재채기와 대화시 토출되는 비말의 속도측정을 위해 PIV장치를 이용한 실험적 연구와 수치 해석적 연구를 수행하고 있다. 또한, 부유입자 중 바이오에어로졸을 실시간으로 구분할 수 있는 UV-APS(TSI Inc.)장비를 활용하여, 토출입자의 입경분포 측정에 활용하고 있다. PIV장비는 Laser(Nd: YAG, 532nm), 동기화장치(synchronizer), 전원장치, 접사용 렌즈가 부착된 CCD 카메라, 입자발생기와 제어장치로 구성되어 있다 (Fig. 3).

PIV 실험조건은 표 1과 같으며, 성인남자 18명(25~44세)과 성인여성 8명(26~33세)을 대상으로 챔버 전면부에서 인위적인 재채기를 3회 수행하여 속도분포를 측정하였다.

Table 1. PIV operating parameters.

PIV Parameters	Values
Pulse Rep Rate(Hz)	14.50
Laser Pulse Delay( $\mu$ s)	400.00
Delta T( $\mu$ s)	100.00
PIV Exposure( $\mu$ s)	490
Field of View	247mm × 184mm
Image Dimensions	1487 pixels × 1039 pixels
Cylindrical Lens	FL : -15mm

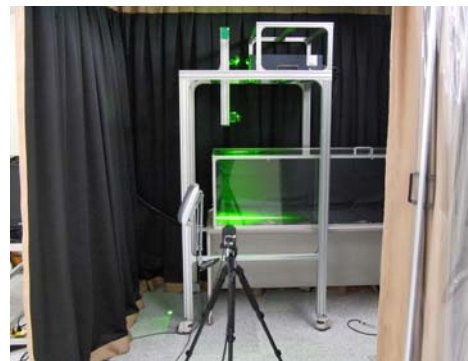
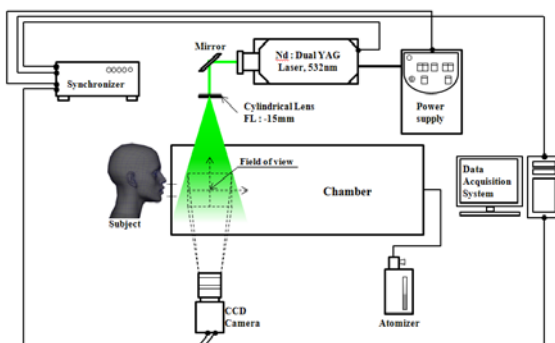


Fig. 3. PIV를 이용한 토출비말의 속도분포 측정시스템 구성.

Fig. 4는 피시험자가 한 번의 재채기를 수행하였을 때, 특정위치(입 주변)에서 시간에 따른 재채기의 속도벡터를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 재채기 후 약 280ms가 경과한 시점(Fig. 4(b))에서 최대 속도 분포를 나타내고 있다. 이와 같은 방법으로 각 피시험자가 수행한 세 번의 재채기에 대해 평균적인 값을 도출하고, 총 26명의 피시험자 데이터를 분석함으로써 평균적인 재채기 토출속도를 연구하고 있다(권순박 등, 2010a).

지하철과 같이 사람이 밀집된 공간에서, 재채기와 대화 등을 통해 인체에서 배출되는 감염성 입자의 이동경로 예측과 이에 따른 예방기술 개발을 위한 연구를 수행하고 있다. 지하철 내부의 공조 설비와 승객에 따른 유동장 변화를 수치 해석적 기법으로 분석(Fig. 5)하고, PIV실험과 입경분포 측정실험을 통해 얻어진 비말의 초기속도와 입경분포를 활용함으로써 토출 비말의 공기역학적 이동현상을 규명할 수 있을 것으로 기대한다(권순박 등, 2010b).

공기감염 예측기술분야의 국내외 주요연구기관과 연구개발 내용은 표 2와 같이 요약하였다. 국외의

경우 인체 토출비말의 측정분야와 수치해석을 활용한 거동예측 분야를 중심으로 연구가 이루어지고 있으며, 국내에서는 다중이용시설의 부유미생물 현황분석 연구와 위해성 평가 연구가 주로 수행되고 있는 실정이다.

### 2.3 공기감염 역학연구 동향

역학연구는 질병을 일으키는 원인을 찾아내는 일련의 과정을 말한다. 특히, 감염병 역학에서는 감염의 경로를 파악하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러나 감염병 역학연구의 대부분은 기술적인 문제로 인해 공기감염을 중요한 감염경로 분류하고 있지 못하고 있으며, 따라서, 그 영향에 대한 연구도 거의 이루어지지 못하였다. 그러나 최근 공기감염의 중요성이 점점 강조되고 있으며, 특히, 일부 감염병에 있어서는 중요한 감염경로로 인식되고 있다. 공기감염으로 전파되는 질병에는 결핵, 인플루엔자, 풍진 등 호흡기 계통의 질환이 대부분이다. 특히, 최근 전 세계 최근에 가장 문제가 되었던 중증급성호흡기증후군(SARS, severe acute respiratory syndrome)

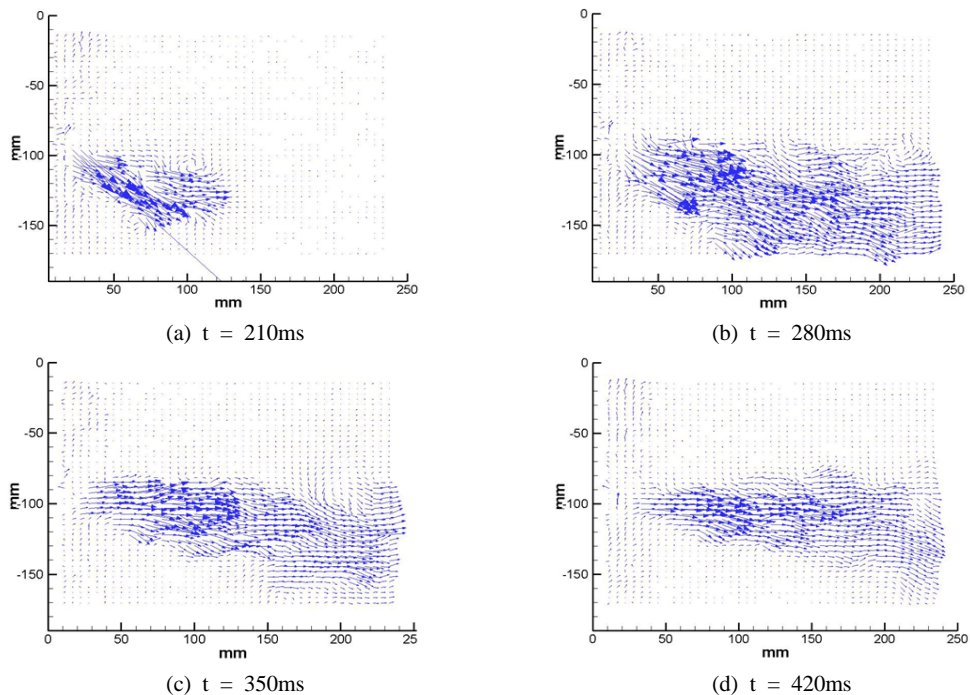


Fig. 4. PIV를 이용한 토출비말의 속도분포 측정시스템 구성.

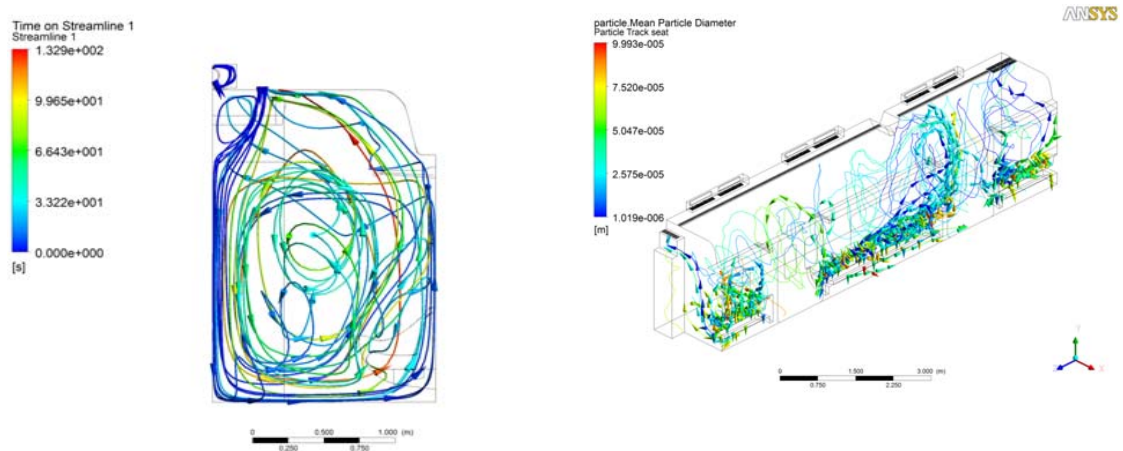


Fig. 5. 지하철 객실내 유선(stream line)패턴과 좌석위 승객에 의해 발생하는 입자의 궤적.

Table 2. 국내외 공기감염 관련 주요연구기관 및 현황.

국내외 주요연구기관	주요 연구내용 및 활용
Lawrence Berkeley National Laboratory (미국)	건축물내 부유오염물질 거동해석 연구, 인체유해성 최소화 건축물 환기 등 에너지 소비 최적화설계
NIST (미국)	실내환기 및 오염물질거동 시뮬레이션 툴 개발 범용소프트웨어 보급 : Contam
University of New York (미국)	AIIR(Airborne Infection Isolation Room)에서 호흡 입자 전산수치해석 병원 무균실에서의 보호장비 최적 착용 방안 제시
Waseda University (일본)	실내 바이러스 제거기술 개발
University of Tokyo (일본)	타액 이동특성 파악 및 질병 전파 경로 규명
University of Hong Kong (중국)	감염성물질의 거동 파악 및 전파 메커니즘 규명
Hong Kong Polytechnic University (중국)	인체발생오염원의 이동에 대한 수치해석, 실내 환기 방안의 최적화
Queensland University of Technology (호주)	채취기시 토출되는 바이오에어로졸 정량화 감염성 바이오에어로졸의 거동특성 이해
The University of Tokyo (일본)	실내공간 수치해석 및 바이오에어로졸 유동 가시화 실험연구
Tsinghua University (중국)	호흡에 의해 발생하는 입자에 대한 수치적 연구
한양대학교 산업의학연구소	다중이용시설 내의 오염물질 경향 분석 미세먼지의 건강 위해성 평가기법 개발
연세대학교 의과대학 예방의학교실	다중이용시설 오염물질로 인한 건강 위해성 평가, 감염 전파경로 예측모델연구
서울시립대학교	실내 환기시설에 의한 오염물질의 거동 연구 지하역사내 실내공기질 예측 모델 개발
단국대학교	실내 곰팡이 오염 현황 분석 및 측정평가기술 개발
경원대학교	실내 미생물 거동 파악(범용소프트웨어 Contam 활용)
한국철도기술연구원	철도시설(차량, 역사)내 부유미생물연구 토출 비밀 거동특성연구

도 공기감염으로 인한 전파로 추측하고 있다. 최근 까지 SARS의 공기감염에 대한 많은 역학연구가 발표되었는데, 그 중 홍콩의 SARS 발생에 대한 역학조사(Yu et al, 2004)에서는 환자가 최초 발생한 건물로부터 바람의 방향이 일치하는 지점의 다른 건물에서 환자가 지속적으로 발생한 것으로 보고하여, SARS의 공기감염 가능성을 제시하였으며, 이후, SARS의 경우 공기감염이 가능한 질환으로 분류되고 있다. 또한, 비행기의 이동 중에는 많은 사람들이 일정 공간 안에 일정 시간 동안 모여 있기 때문에 좁은 공간 안에서 SARS의 전파력을 측정할 수 있는 역학조사가 가능하였다. Olsen 등(2003)은 SARS환자 한명을 포함한 119명의 승객을 태운 비행기에서 이후에 22명의 SARS환자가 발생한 것으로 보고하였고, SARS의 원인이 된 환자와 새로 발병한 환자들 사이에는 물리적인 접근도가 관련이 있었지만, 특히, 23명중 8명은 환자의 앞쪽에 앉아 있었던 것으로 조사되었다.

공기를 통해 전파가 가능한 중요한 질병 중 하나가 결핵이다. 전 세계적으로 17억 명의 환자가 있고, 매년 300만 명의 사망자가 발생하는 것으로 추정되고 있다. 1990년대의 WHO의 보고에 의하면 해마다 800만 명의 환자가 새로 발생하는 것으로 보고하였다. 결핵은 대부분 비말핵을 통해 전파가 되는 것으로 알려져 있으며, 최근 공기감염의 가능성에 대한 일부 모델링 연구가 일부 진행이 되었다(Jones 등, 2009). 결핵균은 비말핵에서 수일간 생존할 수 있어서 공기감염으로 전파가 가능하며, 전염된 후에는 잠복기가 수년까지 갈 수 있다. 그리고 환자의 약 90%는 전형적인 임상증상을 보이지 않기 때문에 질병에 대한 지각이 늦어져 주위사람들에게 전염될 가능성이 매우 높은 질환이다.

최근 전 세계 많은 문제가 되고 있는 신종인플루엔자의 경우 비말에 의한 감염이 주된 전파경로로 알려져 있다. 1979년도에 비행기 엔진이상으로 인한 출발 지연시 공기순환장치를 끈 채로 기내에 대기 중이던 승객들 중에서 인플루엔자가 집단적으로 발병한 사건이 있었는데(Moser et al, 1979), 기내에 탑승한 후 72시간 내에 승객의 72%와, 승무원의 40%에서 인플루엔자 독감이 발생한 것으로 조사되었다. 또한, 75명의 승객 들이 독감환자와 함께 3시간 반 동안 비행을 한 후, 20명의 환자가 발생하였는데, 대

부분의 환자가 환자 주위에 앉아있었던 것으로 조사되었다(Marsden et al, 2003). 이러한 연구결과는 독감의 전파가 환자의 비말에 의한 직접전파로 볼 수 있다. 그러나 비말에 의한 감염이 비록 주된 신종인플루엔자의 전파 경로인 것으로 보고되고 있지만(Brankston 등, 2007; Han K, 2009), 최근 공기감염의 가능성이 지속적으로 제기되고 있다(Tellier, 2009; Weber 2008; Wein 2009). 최근 실험동물 모델을 이용한 인플루엔자 바이러스 전파 양상을 조사한 연구에 의하면, 인플루엔자 바이러스의 공기감염의 가능성이 있으며, 이는 인플루엔자 바이러스의 종류에 따라 차이가 있다고 보고하였다(Mubareka 등, 2009). 특히, 응급의료시설을 대상으로 인플루엔자 바이러스와 호흡기세포융합(respiratory syncytial) 바이러스를 조사한 결과, 이들 바이러스가 의료시설의 공기 중에 지속적으로 분포하고 있으며, 공기 중에서 어느 정도 시간 동안 생존할 수 있는 것으로 조사되었다. 따라서, 공기감염의 가능성이 매우 높다고 할 수 있다(Lindsley 등, 2010).

#### 2.4 질병전파 모델링

의학 및 보건학 분야에서는 환자예측을 위해 다양한 접근법을 사용하는데, 대표적인 분야가 감염병의 환자 예측(혹은 질병 전파)을 위한 모델링이다. 본 논문에서는 수학적 모델의 이론적인 부분은 생략하고, 그 의미에 대해 간략하게 설명하고자 한다. 감염병학의 수학적 접근은 1760년 Daniel Bernoulli의 천연두(smallpox) 모델로 거슬러 올라가며, 대부분의 기본이론이 1900년에서 1925년 사이에 개발되었고 이후로 지속적으로 발전하였다. 근래에는 2001년 영국의 수족구병의 경우와 같이 정책수립 과정에 대응책의 효과를 평가하는 모델들이 사용되고 있다. 2002년-2003년 SARS 유행은 감염병의 진행을 예측하고 서로 다른 통제 전략들의 효과를 비교하기 위한 수학적 모델에 대한 큰 관심과 중요성을 불러일으켰으며, 최근의 인플루엔자 대유행은 이러한 관심을 더욱 높이고 있다. 의학 및 보건학 분야의 질병 전파 모델은 환자로부터 다른 환자에게 질병이 전파되는 양상의 변화에 중점을 두고 있는 반면, 타 분야, 특히 공학 분야에서의 감염 전파 혹은 공기감염 전파(airborne transmission of infectious disease) 모델의 경우에는 매체를 통한 인체의 감염



가능성(contagiousness)에 초점을 두고 있다. Wells-Rilly 방정식을 이용한 소규모 공간에서의 공기감염 가능성을 평가하기 위한 모델과 확률론적 모델을 이용한 멀티존 모델(multi-zone model), CFD (computational fluid dynamic) 모델 등이 대표적이다 (Riley 등, 1978; Jones 등, 2009; Qian 등, 2009). 그러나 질병 전파 모델과 감염전파 모델은 서로 독립적인 것이 아니라, 상호 보완적인 관계에 있다. 후자를 통해 산출된 소규모 지역에서의 감염력(contagiousness)이 전자의 모델에서는 중요한 하나의 모수(parameter)로 포함되기 때문이다.

질병 전파(disease transmission)에 대한 수학적 모델은 크게 결정론적 모델(deterministic model)과 확률론적 모델(stochastic model)로 분류할 수 있으며, 확률론적 모델은 시간과 상태 변수의 성격에 따라 discrete time Markov chain (DTMC) 모델, continuous time Markov chain (CTMC) 모델, stochastic differential equation (SDE) 모델이 있다. 의학 및 보건학 분야에서 환자 전파 모델링을 하는 이유는, 감염병의 경우 환자수가 폭발적으로 증가하기 때문에 보건의료시스템의 붕괴 및 기업 연속성(business continuity)과 밀접한 관련이 있기 때문이다. 환자 전파 모델링은 실험적 검증이 불가능한 경우, 혹은 검증이 비윤리적인 경우에도 적용이 가능하며, 질병 유행에 대응하는 다양한 통제 전략(마스크 착용, 예방백신 접종, 휴교 등)의 효과를 비교하는 도구로서 활용이 가능하기 때문이다. 세계보건기구에서 권고하는 신종인플루엔자의 대응 전략도 질병 전파 모델을 참고로 수립되었다(Ferguson 등, 2005). 외국의 경우 다양한 질병 전파에 관련된 수학적 모델링 연구가 활발하게 이루어지고 있으나, 우리나라에서는 아직까지 이 분야에 대한 연구가 진행되지 못하고 있으며, 개념적인 수준에 머물러 있다(이상원, 2009; 천병철, 2005). 현재 사용되고 있는 질병 전파 모델의 경우, 사람들의 접촉 빈도를 조사하여 감염 가능성을 분석하기 때문에, 실제 전파에 중요한 부분을 차지하고 있는 공기감염은 현재 고려되고 있지 못하고 있으며, 따라서 공기감염 예방을 위한 개인보호구 등에 대한 효과의 평가도 제대로 이루어지고 있지 않다(Aledort, 2007).

### 3. 결 론

일일 생활권의 확대 등으로 과거에는 수개월에 걸쳐 진행되었던 질병의 전 세계적 전파가 최근에는 수주일 이내에 발생하게 되었지만, 감염병의 특성상 예방백신의 생산 및 치료제의 개발에는 적어도 3개월 이상의 시간이 소요된다. 특히, 공기를 매개체로 전파되는 공기감염의 경우 그 전파속도는 더욱 더 짧아질 수밖에 없다. 따라서, 의약적 개입(pharmaceutical intervention: 치료제, 예방백신 접종 등)으로 인한 감염병 봉쇄전략은 매우 제한적이며, 비의약적 개입(non-pharmaceutical intervention: 마스크 착용, 공기청정기 사용, 휴교 등) 위주의 봉쇄전략을 수립하는 것이 매우 중요하다. 그러나 현재까지 마스크, 공기청정기, 실내 환기 등의 기술이 공기감염 메커니즘에 대한 충분한 이해를 기반으로 한 기술이라고 하기에는 부족한 실정이다. 이는 현재까지도 관련분야의 연구가 충분히 검증되지 못했기 때문이며, 최근 감염자로부터 토출되는 비말의 특성(크기, 토출속도, 농도 등)에 따른 이동경로 예측 및 공기역학적 특성연구가 활발하게 진행되는 이유이기도 하다.

향후, 공기감염 분야의 연구는 토출비말의 특성과 약을 기반으로 한 제거기술 및 환기시스템 개발 기술이 공학적 측면에서 부각될 것으로 예상되며, 의학 및 보건 분야에서는 인체유해성 측면과 전파경로 예측을 통한 봉쇄전략 수립 등의 연구가 매우 중요한 주제로 부각될 것으로 예상된다.

### 감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-신기술 융합형 성장 동력 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2009-0082056).

### 참 고 문 헌

권순박, 박재형, 조영민, 박덕신, 배귀남 (2010a) 재채기에 의한 실내공기감염 특성 연구 - 속도분포 측정, 한국대기환경학회 춘계학술대회



- 권순박, 박덕신, 조영민, 김세영, 배광호, 조관현, 유건중, 김정수 (2010b) 전산수치해석 모델을 활용한 지하철 객실공기질 예측기술, 한국대기환경학회 춘계학술대회
- 이상원 (2009) 우리나라 신종 인플루엔자 대유행 예측 모델링 및 1918년 대유행에 대한 적용과 분석, 충북대학교 대학원
- 천병철 (2005) 신종인플루엔자 대유행의 확산과 영향 모델링, 예방의학회지, 38(4):379-385
- Aledort JE, Lurie N, Jeffrey W, Bozzette SA. Non-pharmaceutical public health interventions for pandemic influenza: an evaluation of the evidence base. *BMC public health*. 2007;7:(208) doi:10.1186/1471-2458-7-208
- Brankston G, Gitterman L, Hirji Z, Lemieux C, Gardam M. Transmission of influenza A in human beings. *Lancet Infect Dis* 2007;7(4):257-265.
- Chao, C.Y.H., Wan, M.P., Morawska, L., Johnson, G.R., Ristovski, Z.D., Hargreaves, M., Mengersen, K., Corbett, S., Li, Y., Xie, X., and Katoshevski, D.(2009) Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening, *Journal of Aerosol Science*, 40, 122-133.
- Ferguson NM, Cummings DA, Cauchemez S, Fraser C, Riley S, Meeyai A, et al. Strategies for containing an emerging influenza pandemic in Southeast Asia. *Nature*. 2005;437(7056):209-14.
- Gupta, J. K., Lin, C-H., Chen, Q.(2009) Flow dynamics and characterization of a cough, *Indoor air*, 19, 517-525.
- Gupta, J.K., Lin, C-H., Chen, Q.(2010) Characterizing exhaled airflow from breathing and talking, *Indoor air*, 20, 31-39.
- Han K, Zhu X, He F, Liu L, Ahnag L, Ma H, Tang X, Huang T, Zeng G, Zhu BP. Lack of airborne transmission during outbreak of pandemic (H1N1) 2009 among tour group members, China, June 2009. *Emerg Infect Dis* 2009;15(10):1578-81.
- Hinds, W.C.(1999) *Aerosol Technology - Properties, behavior, and measurement of airborne particles* 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Jones RM, Masago Y, Bartrand T, Haas CN, Nicas M, Rose JB. Characterizing the Risk of Infection from *Mycobacterium tuberculosis* in Commercial Passenger Aircraft Using Quantitative Microbial Risk Assessment. *Risk Analysis* 2009; 29(3):335-365
- Li, Y.(2009) Ventilation and airborne infection, Plenary Talks at Healthy Building 2009
- Li, Y., Huang, X., Yu, I.T.S., Wong, T.W., Qian, H.(2004) Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in Hong Kong, *Indoor air*, 15, 83-95.
- Lindsley WG, Blahere FM, Davis KA, Pearce TA, Fisher MA, Khakoo R, Davis SM, Rogers ME, Thewlis RE, Posada JA, Redrow JB, Celik IB,
- Liu, Z., Zheng, Y., Jia, L., Zhang, Q.(2007) An experimental method of examining three-dimensional swirling flows in gas cyclones by 2D-PIV, *Chemical Engineering Journal*, 133, 247-256.
- Marsden M et al. Influenza outbreak related to air travel. *Med J Aust* 2003; 179: 172-3
- Mazumdar, S. and Chen, Q.(2009) A one-dimensional analytical model for airborne contaminant transport in airliner cabins, *Indoor Air*, 19, 3-13.
- 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 tract during expiratory activities, *Journal of Aerosol Science*, 40, 256-269.
- Moser MR et al. An outbreak of influenza aboard a commercial airliner. *Am J Epidemiol* 1979; 110: 1-6.
- Mubareka S, Lowen AC, Steel J, Coates AL, Garcia-Sastre A, Palese P. Transmission of influenza virus via aerosols and fomites in the guinea pig model. *JID* 2009;199:858-65.
- Qian H, Li YG, Nielsen PV, Huang XH. Spatial distribution of infection risk of SARS trans-

- mission in a hospital ward. *Build Environ.* 2009;44(8):1651-1658.
- Riley EC, Myrphy G, Riley RL. Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *Am J Epidemiol* 1978;107:421-31.
- Sonja J. Olsen et al, Transmission of the Severe Acute Respiratory Syndrome on Aircraft. *N Engl J Med* 2003;349:2416-22.
- Tang JW. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents. *J R Soc Interface* 2009;6:s737-46
- Tellier R. Aerosol transmission of influenza A virus: a review of new studies. *J R Soc Interface* 2009;6(Suppl 6):S783-S790.
- Weber TP, Stilianakis NI. Inactivation of influenza A viruses in the environment and modes of transmission: a critical review. *J Infect* 2008;57(5):361-373.
- Wein LM, Atkinson MP. Assessing infection control measures for pandemic influenza. *Risk Anal* 2009;29(7):949-962.
- Yan, W., Zhang, Y., Sun, Y., Li, D.(2009) Experimental and CFD study of unsteady airborne pollutants transport within an aircraft cabin mock-up, *Building and environment*, 44, 34-43.
- Yu, IT. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus. *N Engl J Med.* 2004 Apr 22;350(17):1731-9.
- 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.