

실내 바이오에어로졸의 저감 및 제거기술

배귀남 | 한국과학기술연구원
지구환경센터 센터장
E-mail : gnbae@kist.re.kr

1. 머리말

산업의 발달로 경제적 풍요를 누리게 된 선진국과 절대적 빈곤에서 벗어난 중진국에서는 건강한 삶(healthy life)을 추구하고 있다. 최근 나노기술의 발달로 나노물질(nanomaterial)이 함유된 제품이 상용화되면서 나노물질이 인체 및 생태계에 미치는 영향에 대한 논의가 사회적 관심사로 다루어지고 있다. 또한, 2009년 신종인플루엔자가 전 세계적으로 대유행하여 800여명 이상의 사람이 사망하는 사건이 발생되면서 안전에 대한 관심이 더욱 고조되고 있다. 그리하여 현대인들이 추구하는 건강한 삶은 쾌적성(comfort), 안전성(safety) 및 건강성(health)이 확보된 생활을 의미하고 있다.

산업의 발달로 공장이 증가하면서 부산물로 각종 유해물질(hazardous air pollutants, HAPs)이 굴뚝을 통해 대기로 배출되어 시정을 악화시키고 환경성질환(environmental dieses)을 유발함에 따라 각국에서는 대기오염도 기준을 설정하여 정부나 지방자치단체에서 대기오염물질을 모니터링하고, 주요 배출원을 관리하고 있다. 많은 사람들이 밀집되어 생활하는 도시지역에서 시민의 건강을 보호하기 위하여 발전소, 화학공장 등 대표적 배출원은 도시

인접지역에서 벗어나 바닷가나 전원지역에 건설되어 가동되고 있다. 그런데 자동차 산업의 발달과 경제적 여유에 힘입어 자동차가 생활필수품으로 자리매김함에 따라 도시지역에서 자동차가 발전소, 공장 등을 대신하여 대표적 유해물질 배출원으로 지목되고 있다. 특히, 자동차는 이동하면서 다양한 유해물질을 배출하고, 배출원으로부터 거리에 따라 오염의 영향이 급격히 감소하는 국소적 농도 대기오염(hot spot) 현상을 나타내는 특징이 있다. 서울과 같은 대도시의 경우 많은 아파트들이 도로에 인접한 곳에 위치하고 있어 이곳에서 생활하는 시민들은 소음뿐만 아니라 자동차 배출가스에 의한 대기오염의 영향을 더 심하게 받고 있을 것이다.

농경사회에서 산업사회로, 최근에는 지식산업사회로 변화되면서 인간의 생활공간이 실외에서 실내로 바뀌고, 그 비중도 점차 증가하여 선진국의 경우 대부분의 사람들이 약 85% 이상을 실내에서 생활하고 있다. 양원호 등(2009)이 조사한 국소환경에서 시간활동 양상에 대한 자료에 따르면, 평일에 한국인은 약 87.56%를 실내환경에서 생활하고 있다. 먹는 물과 더불어 숨쉬는 공기도 우리의 건강에 지대한 영향을 미친다는 인식이 점차 확산되면서 일반 대기(ambient air)와 구분하여 실내공기(indoor

air)에 대한 관심이 높아지고, 이에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있으며 관련 산업도 크게 성장하고 있다. 일부에서는 공기산업을 미래산업의 하나로 인식하여 대응하고 있다. 국제적으로도 제1회 Indoor Air Symposium이 덴마크의 코펜하겐에서 1978년에 개최된 이후 계속하여 Indoor Air, Healthy Buildings, ROOMVENT 등의 국제학술대회가 3년 주기로 번갈아 가면서 매년 개최되고 있으며, 기존 학술대회에서도 실내공기 분야를 중요한 연구 주제로 선정하여 심도있게 다루고 있다.

실내공기에는 우리의 건강을 해칠 수 있는 미세먼지(PM₁₀), 이산화질소(NO₂), 일산화탄소(CO), 폼알데하이드(HCHO), 담배연기, 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs), 라돈(Rn), 석면, 바이오에어로졸(bioaerosol) 등 다양한 유해물질이 존재한다. 또한, 생활환경의 변화와 더불어 측정분석 기술의 향상과 같은 연구개발의 결실에 따라 지금까지 알려지지 않은 새로운 유해물질이 계속 밝혀지고 있다.

WHO(World Health Organization)에서도 실내공기가 어린이, 노인 및 천식환자의 건강에 중요한 영

향을 미칠 수 있을 것으로 판단하여 실내공기질 가이드라인(indoor air quality guidelines)을 준비하고 있다. 표 1에 나타낸 바와 같이 실내공기질 가이드라인에 포함될 중요한 인자를 크게 3가지로 구분하고 있다. 즉, 일반 오염물질(pollutants), 생물학적 인자(biological agents) 그리고 실내연소(indoor combustion)로 그룹을 만들어 실내공기질(indoor air quality, IAQ)을 관리할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 개개 오염물질에 대한 대응과 더불어 유사 또는 복합 오염원에 대한 관리가 필요하다는 인식이 확산되고 있는 추세이고, Godish(2001)는 자신의 저서에서 실내오염물질(indoor air pollutants)을 크게 4가지로 구분하여 제시하고 있다. 즉, 무기 오염물질(inorganic pollutants), 연소 발생 오염물질(combustion-generated pollutants), 유기 오염물질(organic pollutants) 및 생물학적 오염물질(biological pollutants)로 구분하고 있다. 석면, 라돈, 납이 무기 오염물질에 속하고, 연소 발생 오염물질로는 CO₂, 수증기(H₂O), CO, NO, NO₂, 호흡성 입자(respirable particles), HCHO, VOCs, 아황산가스(SO₂) 등이 있으며, 유기 오염물질로는 알데하이드류(aldehydes),

표 1. WHO 실내공기질 가이드라인에 포함될 중요한 인자

Group A Pollutants	Group B Biological agents	Group C Indoor combustion
Formaldehyde Benzene Naphthalene Nitrogen dioxide Carbon monoxide Radon Particulate matter (PM ₁₀ and PM _{2.5}) Halogenated compounds Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), especially benzo[a]pyrene	Dampness and mould Ventilation - natural - forced/mechanical Allergens - from house dust mites - from pets	Stove venting - flues - hoods Ventilation - natural - forced Combustion quality Fuels - solid - processed solid - liquid - gas - electricity

VOCs/SVOCs(semi-VOCs), 살충제(pesticides) 등이 속한다. 생물학적 오염물질로는 질병증후군(illness syndromes), 세균(bacteria), 바이러스(viruses), 진균(mold) 및 곤충, 진드기(mite), 동물 알레르겐(animal allergens)에 대한 노출 등이 있다.

20세기에는 생물학적 오염물질이 실내오염물질로 미약하게 다루어졌으나, 2003년 급성호흡기증후군(severe acute respiratory syndrome, SARS)의 확산 그리고 2009년 신종인플루엔자의 대유행이 바이러스의 공기전파(air transmission)에 의한 감염으로 밝혀지면서, 실내공기에서 생물학적 오염의 중요성이 크게 부각되었다. 그러나 아직 생물학적 오염에 대한 지식, 정보가 매우 부족하여 실내공간에서 생물학적 오염에 효과적으로 대처하지 못하고 있는 실정이다.

실내에서 생물학적 오염을 관리하기 위한 방안을 정리하여 그림 1에 나타냈다. 실내에서 생물학

적 오염에 의한 리스크를 관리하기 위해서는 먼저 생물학적 오염물질의 샘플링 및 분석을 통해 오염 현황을 정확하게 파악하고 오염 현상에 대하여 충분히 이해할 필요가 있다. 또한, 생물학적 오염물질의 실내 오염도 수준을 적절하게 관리하기 위해서는 생물학적 오염물질의 감지 센서나 실시간으로 모니터링이 가능한 미생물 측정기가 필요하다. 최근 건물의 공조설비에 장착된 집진필터에 여과된 미생물(바이오에어로졸)이 죽지 않고 서식하면서 냄새(microbial volatile organic compounds, MVOCs)를 유발하거나 실내로 다시 유입되는 것이 문제로 지적되고 있다. 이에 따라 공기 중에 부유하는 바이오에어로졸을 집진하여 증식을 억제하거나 공기 중에서 바로 살균하는 항균 기술이 활발하게 연구되고 있다. 일반적으로 미생물은 습도가 높은 곳에서 서식하므로, 환기나 제습 등을 통해 실내 생물학적 오염도 수준을 저감시킬 수 있다. 추가로 실내

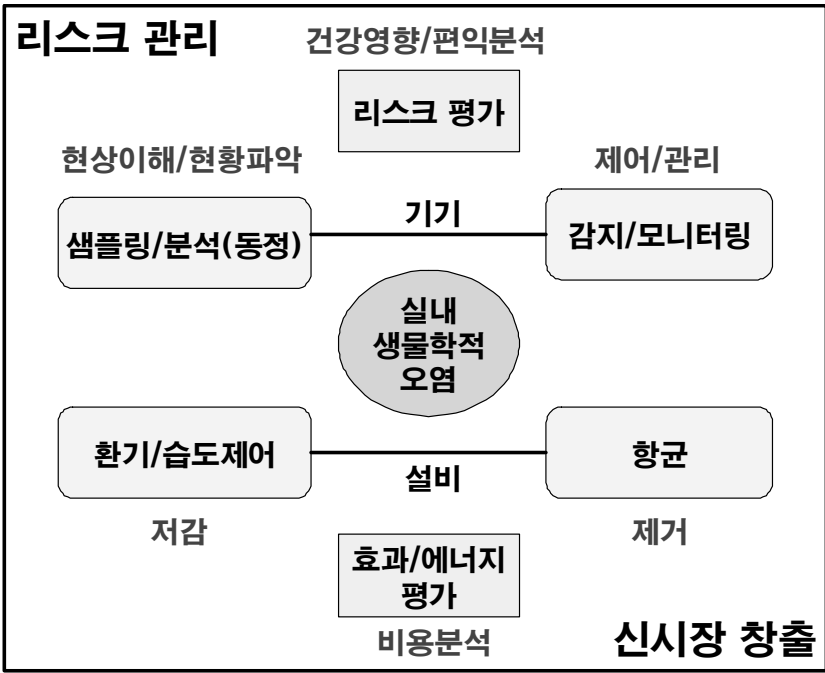


그림 1. 실내 생물학적 오염의 관리 방안

생물학적 오염도 현황 자료를 기반으로 리스크 평가를 수행하여 인체의 건강에 미치는 영향을 분석하고, 사망 및 질환 예방 등 사회적 편익을 추정하는 작업이 필요하다. 이와 더불어 실내 생물학적 오염물질의 저감 및 제거 설비의 효과(제거효율 등의 성능 및 임상적 효과)를 평가하고 이들 설비의 사용에 따른 에너지 소비도 분석하여 저탄소 녹색성장 에 대한 객관적 자료를 확보할 필요가 있다. 실내 생물학적 오염물질을 감지/모니터링하기 위한 센서, 측정기기의 비용을 포함하여 전체적인 비용/편익을 추정할 필요가 있다. 이러한 체계적인 접근을 통해 실내 생물학적 오염물질의 리스크 관리 체계를 구축할 수 있으며, 관련 기기 및 설비를 개발하여 보급함으로써 새로운 시장을 창출하여 녹색성장 과 고용창출에 기여할 수 있다.

실내공기 중에 부유하는 세균(박테리아)과 진균(곰팡이)은 알레르기 반응을 일으키게 하는 항원으로 실내공기 중에 넓게 분포되어 있으며, 실내 환경 조건에 따라 더욱 증가되어 전염병을 매개시키는 역할을 하거나 직접적으로 피부 질환, 알레르기성 질환, 기관지 천식 등을 유발시킨다. 이 글에서는 기존 문헌을 조사, 분석한 것을 바탕으로 다양한 생물학적 오염물질 중에서 실내에서 부유하는 미생물(바이오에어로졸)인 세균과 진균을 중심으로 실내 오염현황, 제거 및 저감 기술에 대하여 소개하고자 한다.

2. 실내 바이오에어로졸의 오염 현황

미국, 프랑스, 영국, 일본, 캐나다 등 선진국에서는 자국의 건물 실내에 존재하는 미생물의 특성을 파악하기 위하여 많은 연구를 수행하고 있다. 국내에서는 실내 바이오에어로졸의 오염 현황에 대한 연구가 미흡하여 주로 이러한 국외 자료를 인용하여 사용하였다. 그러나 국내에서도 2003년 ‘다중이

용시설 등의 실내공기질 관리법’이 공포되어 2004년부터 시행되었고, 총부유세균이 의료기관, 보육 시설, 노인의료시설, 산후조리원과 같은 다중이용 시설의 실내공기질 유지기준 대상 오염물질에 포함됨에 따라 최근에 세균과 진균에 대한 조사가 많이 이루어지고 있다. 이들 다중이용시설의 실내에서 총부유세균 농도가 800 CFU/m³ 이하로 유지되도록 규정하고 있다.

김윤신 등(2005)이 2004년 봄에 수도권에 위치한 다중이용시설 30곳을 대상으로 실내외에서 총부유세균을 측정된 결과에 의하면, 실내에서 평균 총부유세균 농도는 대규모점포 206 CFU/m³, 지하상가 487 CFU/m³, 유치원 430 CFU/m³, 병원 456 CFU/m³, 식당 390 CFU/m³, 찜질방 278 CFU/m³, 노래방 407 CFU/m³, 아파트 484 CFU/m³, 실내주차장 200 CFU/m³, 지하역사 504 CFU/m³이었다. 이치원 등(2006)이 2005년 가을에 충남에 위치한 학원, 음식점, 업무시설 등 미적용 다중이용시설 22곳을 대상으로 총부유세균과 진균을 측정된 결과에 따르면, 총부유세균과 진균의 평균 농도는 각각 학원 259, 107 CFU/m³, 음식점 464, 287 CFU/m³, 업무시설 223, 271 CFU/m³이었다.

손종렬 등(2006)이 2004년 6월부터 2005년 3월까지 9개월 동안 전국의 유치원과 초·중·고등학교 55곳의 일반 교실과 특별실(과학실, 컴퓨터실)을 대상으로 총부유세균을 측정된 결과에 의하면, 평균 총부유세균 농도는 유치원, 초등학교, 중학교, 고등학교 순으로 각각 1320, 959, 856, 745 CFU/m³이었다. 교실별로는 일반 교실의 평균 총부유세균 농도가 1237 CFU/m³로 과학실(676 CFU/m³)과 컴퓨터실(707 CFU/m³)에 비해 높았다. 계절별로는 여름과 가을의 평균 총부유세균 농도가 각각 1407, 1368 CFU/m³로 겨울(936 CFU/m³)에 비해 높게 나타났다. 안상영 등(2006)이 2006년 7월과 11월에 경상 북도에 위치하고, 개교한 지 3년 이내인 초·중·등학

교 6곳의 일반 교실과 보건실을 대상으로 총부유세균을 측정된 결과에 의하면, 여름철 평균 총부유세균 농도는 288 CFU/m³로 겨울철(618 CFU/m³)에 비해 낮았다. 전준민 등(2010)이 2009년 가을에 초·중·고등학교를 대상으로 총부유세균을 측정된 결과에 의하면, 일반 교실에서 평균 713 CFU/m³, 특별실(과학실, 컴퓨터실, 도서관, 음악실)에서 575 CFU/m³으로 일반 교실의 농도가 다소 높은 것으로 나타났다.

노영만 등(2006)이 2004년 여름철에 25~3000톤급 선박을 대상으로 실내공간에서 총부유세균을 측정된 자료에 따르면, 평균 총부유세균 농도는 10~126 CFU/m³으로 대체로 선박이 클수록 낮았고, 항해실과 침실의 총부유세균 농도가 통신실, 기관실, 휴게실에 비해 상대적으로 높았다.

이철민 등(2007)이 국내에서 수행된 부유미생물에 관한 자료를 수집하여 분석한 결과에 의하면, 주택에서 부유세균과 부유진균의 병합평균 농도는 각각 148.06 CFU/m³ (95% 신뢰도 구간 : 20.39~275.74 CFU/m³), 22.66 CFU/m³ (95% 신뢰도 구간 : 0~49.73 CFU/m³)이고, 병원에서 부유세균의 병합평균 농도는 277.75 CFU/m³ (95% 신뢰도 구간 : 210.29~245.22 CFU/m³)으로 추정되었다. 심인숙 등(2008)이 1980년 이후 병원을 대상으로 수행된 부유미생물에 관한 23편의 자료를 분석한 결과에 의하면, RCS air sampler를 이용하여 측정된 부유세균의 병합평균 농도는 병원 194.85 CFU/m³ (95% 신뢰도 구간 : 163.52~226.18 CFU/m³), 수술실 324.75 CFU/m³ (95% 신뢰도 구간 : 37.17~612.34 CFU/m³), 중환자실 182.43 CFU/m³ (95% 신뢰도 구간 : 115.68~249.19 CFU/m³)으로 추정되었고, 병원에서 cascade air sampler로 측정된 부유세균의 병합평균 농도는 367.72 CFU/m³ (95% 신뢰도 구간 : 281.49~453.95 CFU/m³)으로 추정되었다. 또한, 병원에서 RCS air sampler와 cascade air sampler를 이

용하여 측정된 부유진균의 병합평균 농도는 각각 20.66 CFU/m³ (95% 신뢰도 구간 : 3.01~38.31 CFU/m³), 193.34 CFU/m³ (95% 신뢰도 구간 : 163.56~223.12 CFU/m³)으로 추정되었다.

3. 실내 바이오에어로졸의 항균 기술

세균, 진균 등의 바이오에어로졸은 그 종류가 대단히 많고, 생육조건이 맞으면 언제든지 생장, 번식이 가능하다. 그러므로 일상생활에서 사람들은 실내공기 중에 존재하는 유해한 세균 및 진균에 노출되어 있어 질병에 걸릴 위험이 있으며, 특히 의료복지시설의 경우 병원성 미생물로 인한 2차 감염 문제 등을 일으킬 수 있기 때문에 이를 예방하기 위해서는 보다 체계적인 바이오에어로졸의 관리 및 이에 대한 고효율 항균 기능을 구비한 실내 공기청정 기술이 필요하다.

미생물을 제어하는 기술을 항균(antimicrobial) 기술이라 부르고, 항균 기술은 미생물의 생장과 대사를 저지시키는 기술과 물리적·화학적 자극을 가하여 미생물을 말살시키는 기술을 모두 의미하지만, 일반적으로 멸균 또는 소독시키는 기술은 항균 기술이라 부르지 않고 별도로 살균 기술로 구분하여 사용한다.

먼저 실내 공기청정에 적용되고 있는 대표적인 항균 기술을 소개하고자 한다. 실내 바이오에어로졸의 대표적인 항균 기술로 광 에너지 이용 기술, 전기 이온 기술, 유기계·무기계 항균제의 함침법, 효소 필터 등이 개발되고 있으며, 최근에는 열 에너지를 이용하거나 나노 기술을 적용한 항균 에어 필터링 기술도 개발되고 있다. 대표적인 항균 기술을 분류하여 표 2에 나타냈다(박철우 등, 2010).

광 에너지를 이용한 항균 기술은 크게 자외선(UV) 자체를 이용하는 UV 광멸균 기술과 광촉매를

표 2. 실내 바이오에어로졸 대응 항균 기술

세부 기술	대표 기술
광 에너지 이용 기술	UVGI, 전자파 조사, 펄스 백열광, 펄스 전기장, 펄스 필터광, 전기빔
항균 에어 필터링 기술	은 나노 코팅 필터, DNA 필터, 효소 코팅 필터, 키토산 필터
광촉매 산화 기술	산화티타늄(TiO ₂)
공기 오존화 기술	플라즈마
공기 이온 기술	SPi, 가슴 살균 이온, ozone free air ionizer
열 에너지 이용 기술	공조필터의 건열멸균 기술
초음파(ultrasonic atomization) 이용 기술	Sonic generator

이용하는 광촉매 산화(photocatalytic oxidation, PCO) 기술로 구분된다. 자외선은 공기 중 세균과 진균에 대해 항균 효과가 있는 것으로 알려져 있다. UV 광멸균 기술은 단파장(254 nm)의 자외선을 이용하여 세포 내에서 광화학 반응에 의해 세포분열을 억제시켜 항균 기능을 갖게 하는 방법으로 높은 에너지 및 항균 효율을 가지기 때문에 공조 시스템의 덕트 내부 또는 교실과 같은 재실공간의 상층부에 설치하여 사용하고 있다. 자외선은 설치가 용이한 장점이 있는 반면에 UV에 의한 공기의 광화학적 오존 등 유해 부산물이 발생하기 때문에 이에 대한 처리가 문제이며, UV 자체가 인체에 해롭기 때문에 이에 대한 패키징 기술도 고려해야 한다. UV를 이용하는 기술은 일반적으로 UVGI(Ultraviolet Germicidal Irradiation)이라 불리는데, 결핵균 등이 실내에서 확산되어 감염되는 현상을 예방하기 위한 방법으로 많이 연구되고 있다. 광촉매 산화 기술은 자외선을 광촉매(TiO₂ 등)에 조사하면 OH 라디칼 등이 발생하여 유해물질을 산화 분해시킬 뿐만 아니라 활성산소가 방출되어 세균과 접촉하면 세포막을 손상시켜 짧은 시간에 세균을 사멸시킬 수 있다고 발표되고 있다.

전기 이온 기술은 두 극판 사이에 높은 전기장을 형성하여 유입되는 세균을 하전시킴과 동시에 극판의 전기력에 의해 집진하는 원리를 사용한다. 이때 강한 전기장에 의해 세균의 대사가 방해받게 됨에 따라 살균 효과가 일어난다고 보고 있지만, 아직 정확한 살균 메커니즘이 규명되지 않고 있다. 일반 가정용 공기청정기와 산업용 집진장치에 많이 응용되고 있는 기술이지만, UV 광멸균 기술과 마찬가지로 높은 전기장에 의한 오존 등 유해가스 등이 발생하기 때문에 이에 대한 보완 기술이 필수적이다. 공기 중에 인위적으로 전기적 이온을 방출시키면 이온들이 미생물의 수를 물리적으로 감소시키고, 생명성도 감소시키는 것으로 알려져 있다. 공기 중 이온이 주변 표면에 과도하게 농축될 경우 정전기 등을 일으키고, 이온 발생기에서 오존이 발생되면서 인체에 나쁜 영향을 줄 수도 있다. 일본의 샤프(주)에서는 양극성 클러스터 이온을 발생시켜 실내공기를 정화시키는 기술을 개발하여 공기청정기에 적용하고 있다. 최근 삼성전자(주)에서도 플라즈마 이온을 이용한 바이러스 닥터(Samsung Super Plasma ion, SPi)를 시판하고 있다.

함침법에 사용되는 항균제는 크게 무기계 항균제와 유기계 항균제로 구분되고, 공조 시스템의 열교환기 표면이나 활성탄 섬유필터에 항균성 금속 및 산화 금속 나노입자를 액상 전해 방식으로 코팅하는 방법을 취하고 있다. 또한, 공기청정기용 에어필터에 키토산 또는 천연 펩타이드와 같은 항균성 천연물질을 도포하여 항균 기능을 부여하고 있는데, 대부분의 공기청정기에 적용되고 있는 것은 유기계·무기계 항균제를 도포한 프리필터 등급으로, 담지방법의 제한성 때문에 중성능 필터 및 HEPA 급 고성능 필터에는 적용하지 못하고 있다.

효소 필터는 바이오 클린룸 등에 설치된 에어필터에 여과된 바이오에어로졸이 사멸되지 않고 증식하여 생기는 2차 오염을 예방하기 위하여 중성능

또는 고성능 에어필터의 여재에 효소를 담지시킨 것으로, 효소가 일종의 촉매로 작용하여 효소에 의해 세포 벽의 결합 부분이 가수분해 반응으로 절단된 후 세포 막이 파열해 세균이 사멸하는 원리를 이용한 것이다.

액체나 고체 상태의 미생물을 고온으로 가열하여 멸균시키는 방법은 오래 전부터 사용되어 왔다. 고온 환경이 특정 효소를 변성시켜 미생물을 살균시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 공기 중 미생물의 항균 기술에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 이 방법은 고온 조건을 만들기 위해 에너지가 소비되는 단점이 있지만, 주위 환경에 미치는 부작용이 거의 없는 장점이 있다.

다음으로 국내외 연구기관에서 수행하고 있는 다양한 항균 기술의 연구개발 동향을 소개하고자 한다. 미국의 ARTI(Air-conditioning and Refrigeration Technology Institute)에서는 U.S. Department of Energy의 지원으로 공조 시스템의 열교환기 표면이나 집진필터 등 덕트에 설치되어 있는 UV 램프에 대한 멸균 효과를 평가하였다. 미국 USDA Agricultural Research Services에서는 정전기를 이용한 살균 기술을 개발하여 소형 공기 샘플러를 제작하였고, 미국 BioIon Inc.에 기술을 이전하는 연구 성과를 거두었다. 그러나 정전기를 이용하는 방법 면에서 고전압 극판을 사용하기 때문에 이것으로부터 발생되는 오존과 같은 2차 공기오염 부산물이 문제가 되고 있다. 즉, 전극판 정전기의 정도에 따라 오존의 발생이 같이 증가하기 때문에 아직 기술 수준이 소형화에 머무르고 있어 대형화하기 위해서는 발생하는 오존의 처리에 대한 대안이 필요하다. 미국 University of Cincinnati 의대에서는 실내 부유 세균과 바이러스를 제거하기 위한 PTFE(polytetrafluoroethylene), PC (polycarbonate), 젤라틴 필터에 대한 비교 연구를 수행하였으며, 필터 전단계 단극 이온 방출 및 광촉매 산화법을 이용하여 실내공기 오염물질의 저감에 대한 연구를 수행하고 있다. 그러나 아직 기존 필터의 항균

특성에 대한 평가 위주이고, 항균 필터의 개발에 대한 연구는 기초 단계에 머무르고 있다.

경원대에서는 공조 시스템을 모사하는 실험장치를 제작하여 시험 균주로 대장균(*E. coli*)과 *Legionella*를 사용하여 자외선 살균 효과를 조사하는 연구를 수행하였다. 활성탄소섬유필터(activated carbon fiber filter)는 실내 휘발성 유기화합물을 흡착하여 제거하기 위하여 많이 사용되는데, 세균 등 미생물이 쉽게 표면에 부착하여 증식하는 문제가 발생하는 것으로 알려져 있다. 연세대에서는 카본 활성탄에 은을 도금하여 도금 정도에 따른 필터의 압력강하, 물리적 특성 및 항균 특성에 대해서 연구하였다. 기존 dip 코팅 기술을 이용하여 은도금의 양을 달리하였으며, 비공극률 및 평균 기공 크기 등 dip 코팅의 정도가 커짐에 따라 항균 특성은 개선되었지만, 압력강하 등 필터의 유동 특성은 오히려 악화되는 단점이 있어 이에 대한 대안이 필요하다. 건국대에서는 대장균을 공기 부유화시켜 내부 온도를 27~100℃ 범위로 조절된 원통형 튜브를 통과시켜 생존율(survival ratio)을 조사하였다. 온도가 증가함에 따라 생존율이 감소하였고, 100℃에서 생존율은 15%로 크게 감소하였다고 보고하였다. 이들은 후속 연구에서 대장균은 온도가 증가함에 따라 사멸율(culturability loss)이 감소하여 약 140℃에서 99% 이상의 사멸율을 나타냈지만, 포자가 있는 *Bacillus subtilis* var. *niger* 세균은 온도를 180℃까지 높여도 사멸율이 5% 정도로 낮았다고 보고하였다.

최근까지 가장 많이 수행되고 있는 항균 기술은 금속 나노입자를 이용한 것으로 그 중 오래 전부터 항균력이 뛰어나다고 알려져 있으며 타 물질에 비해 경제적인 은 및 구리 나노입자를 많이 이용한다. 대표적으로 한국과학기술연구원(KIST)에서는 실내 환경에서 빈번하게 검출되는 곰팡이인 *C. cladosporioides*와 *A. versicolor*에 대한 금속 나노물질의 항균 특성을 살펴보았다. 여기에서 더 나아가 금속 나노

입자와 바이오에어로졸이 공기 중에서 반응 시 항균 특성 연구도 수행하였다. 항균에 대한 정량적인 지표는 제시하고자 하는 것도 최근의 연구개발 동향이다. 연세대에서는 구리 나노입자와 은 나노입자에 대한 *E. coli*와 *B. subtilis*의 민감도(susceptibility)와 이들이 90% 이상의 항균 효과를 나타내는데 필요한 나노입자의 농도를 정량적으로 제시하였다.

KIST에서는 삼성전자, 한국과학기술원(KAIST)과 공동으로 가전제품에 적용하기 위한 은 나노입자 발생 기술에 대해 연구하였고, KAIST와 삼성전자에서 개발한 은 나노입자 발생장치에 대한 바이오에어로졸의 항균 성능을 평가하였다. 또한, KIST에서는 건국대와 함께 고온 전기로를 이용하여 기상 증발 응축법에 의해 은 나노입자를 발생시키고, 이를 필터에 부착시켜 세균에 대한 항균 성능을 연구하였다. 이러한 에어로졸 공정에서 발생시킨 나노입자가 습도와 같은 주위 환경 변수에 의해 항균 성능이 달라지는 특성에 대해서도 연구하였다.

기존 유기계·무기계 항균제를 필터 여재 표면에 도포하여 미생물의 증식을 방지하는 기술은 액상으로 필터 여재의 표면에 도포하는 방식을 택함에 따라, 많은 양의 항균제가 필터 여재 표면에 불

균일하게 부착되는 문제점 및 건조 공정이 추가적으로 요구되는 단점을 가지고 있다. KIST에서는 에어로졸 공정을 이용하여 항균성 나노입자를 에어로졸 상태에서 제조하여, 그림 2에 나타난 바와 같이 이것을 필터 여재에 균일하게 부착시키는 방법을 제시함으로써 공기 중 바이오에어로졸을 여과함과 동시에 바이오에어로졸이 여재 상에서 증식하는 것을 방지할 수 있는 항균 여재 제조 기술을 개발하였다.

최근에는 기존 항균장치들을 비교하는 연구가 수행되고 있다. LG전자 디지털어플라이언스 연구소에서는 UV lamp, UV LED, ion generator, PEDC(plasma electricity dust collector) 등 여러 공기청정장치에 대해 미생물과 바이러스의 제거 효과를 비교·연구하였으며, 연세대에서는 현재 상용되고 있는 항균 필터 여재의 바이오에어로졸 저감 특성을 비교·연구하였다.

국내외에서 수행되고 있는 항균 필터 관련 연구 현황을 정리하여 표 3에 나타냈고(환경부, 한국환경산업기술원, 2010), 천연물질과 나노물질을 이용한 바이오에어로졸의 항균 기술과 관련된 특허 현황을 정리하여 표 4에 나타냈다.

4. 바이오에어로졸의 저감 기술

현재 실내공기질 관리 기술은 건축자재 및 생활용품에서 방출되는 휘발성 유기화합물과 폼알데하이드의 저감을 통한 아토피피부염, 천식 등 환경성 질환의 예방에 초점이 맞추어져 있다. 그러나 미래의 실내환경 관리 기술은 VOCs, HCHO와 같은 기체상 유해물질의 오염뿐만 아니라 급성호흡기증후군(SARS), 신종인플루엔자 등과 같은 미생물 확산에 의한 공기감염, 건물의 바이오테러 등에 신속히 대응할 수 있어야 한다.

환경성질환/공기감염 대응 건물 공조 기술은 미생물, 나노입자와 같은 오염원으로부터 재실자를

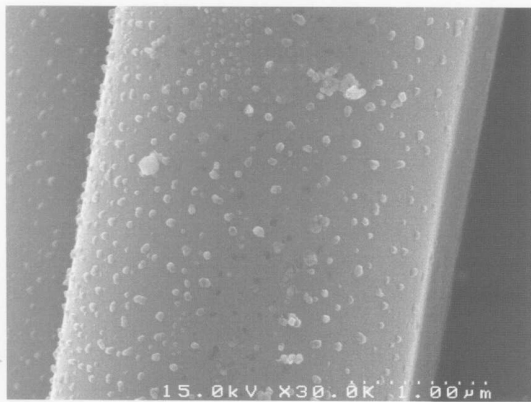


그림 2. 필터 여재 표면에 은 나노입자가 균일하게 도포된 전자현미경 이미지

표 3. 국내외 항균 필터 관련 연구 현황

연구수행기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황
Schuller International, Inc.	오염된 공기의 바이오에어로졸을 줄이는 에어필터 방법	무기계 항균물질을 dip 코팅 방식으로 필터에 흡착, 상용화
Research Foundation of State University of New York	Antimicrobial compositions	항균성분을 가지고 있는 다수의 ligand를 필터 등에 부착시켜 항균
Microban Product Company	Antimicrobial semi-permeable membranes	여러 겹의 멤브레인 필터 사이에 항균물질을 흡착
Rengo Co., Ltd.	Antimicrobial agent	은이 포함된 carboxymethyl cellulose 성분의 섬유를 이용한 항균 기술
가부시키 가이샤 파마 푸즈 연구소 (일본)	약취 제거, 곰팡이 방지 및 항균 필터	탈취/항균용 필터 적용 전망
(주)LG생활건강	다공성의 카본 셀로 이루어진 항균 필터 개발	자동차, 가전제품, 공조, 가스 마스크, 정수기용 항균 필터, 상하수 처리, 공기청정기, 클린룸 등에 적용
(주)대우일렉트로닉스	나노 실버가 도핑된 활성탄 필터 개발	공기청정기, 가전제품 등에 적용
	탄소나노튜브를 이용한 항균 탈취 필터 기술 개발	
(주) 응진코웨이	레지오넬라균 제거 필터 개발	레지오넬라균 제거 필터로 사용 전망
한국생산기술연구원	키토산 천연물질을 이용한 항균 필터 제조 기술 개발	키토산 천연물질 항균 섬유 및 필터의 기술 이전 전망
(주) 바이오드림스	나노-실리카 은 입자를 포함한 항균 필터 개발	환경 친화 항균 필터로 적용 전망
(주) 엔피씨	항균성 나노 금속을 이용한 필터	에어컨, 팬히터, 진공청소기 등 가정용 공기정화기에 활용

표 4. 천연물질과 나노물질을 이용한 바이오에어로졸 항균 기술 관련 특허 현황

방 법	연구 내용	연구 기관	관련 특허
천연물질	벚꽃과 녹차 잎을 이용한 항균 탈취 필터	개인특허	대한민국 10-2006-0018138
	키토산을 이용한 항균 필터의 제조법	생산기술연구원	대한민국 10-2000-0025358
나노물질	은 나노 입자 함유 나노 섬유 및 그 제조 방법	(주) 아모메디	대한민국 10-2006-0028900
	항균성 나노 금속을 함유한 필터 및 이의 제조 방법	(주)엔피씨	대한민국 10-2005-0033693
	나노 카본볼을 구비한 항균 필터	(주)엘지생활건강	대한민국 10-2003-0080769
	나노 실버가 도핑된 활성탄 필터	(주)대우 일렉트로닉스	대한민국 10-2003-0039711
	탄소나노튜브를 이용한 항균 탈취 필터	(주)대우 일렉트로닉스	대한민국 20-2003-0019341
	항균 나노 섬유 필터의 제조 방법 및 이에 의한 항균 나노 섬유 필터	계명대학교	대한민국 10-2008-0062273
	필터에 무기 항균 물질을 흡착시켜 미생물의 항균을 가능하게 하는 필터의 제조 방법	Schuller International, Inc.	국제 특허 EPPD00566051A1
	항균 성분을 가지고 있는 다수의 ligand를 필터 등에 부착시켜 공기 중 미생물의 항균을 가능하게 하는 방법	The Research Foundation of State University of New York	국제 특허 USPD06015816
	여러 겹의 멤브레인 필터 사이에 항균 물질을 흡착시켜 공기 중 미생물의 필터를 통과할 시 항균이 되게 하는 기술	Microban Product Company	국제 특허 USPD06540915
	은이 포함된 carboxymethyl cellulose 성분의 섬유를 이용한 항균 기술	Rengo Co., Ltd.	국제 특허 USPD05709870
	항균 흡착제의 제조방법	한국과학기술연구원	대한민국 10-2009-0894086
	항균 여재 제조장치	한국과학기술연구원	대한민국 10-2009-0924945
	천연물질+ 나노물질	약취 제거, 곰팡이 방지 및 항균용 필터	가부시키 가이샤 파마 푸즈 연구소

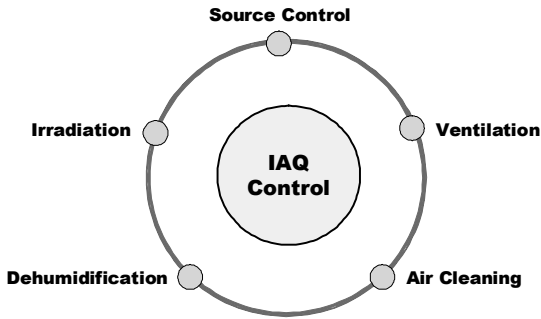


그림 3. 환경성질환 공기감염 대응 실내공기질 제어 기술

보호하기 위해 건물내 채실공간의 공기질에 항균성, 나노입자 대응성을 부여하는 기술이며, 발생원 제어(source control), 환기(ventilation), 공기청정(air cleaning), 제습(dehumidification), 조사(irradiation)가 모두 포함되나(그림 3), 공기청정 기술과 각종 전자파의 조사 기술이 요소 기술로 주로 이용되고 있으며, 그 중 대표적인 것으로 자외선 조사에 의한 공기살균(UVGI)을 들 수 있다.

미국 ASHRAE에서는 치명적인 공기전염 위험성이 있는 미생물 오염물에 대해 건물 공조 요소 기술인 필터나 UVGI를 적용할 경우 미생물의 제거효율이 높아질 것으로 예측하고 있다. 그러므로 필터 및 자외선의 사용 등급을 증가시킬수록 미생물을 효과적으로 제거할 수 있어 오염물질에 노출된 건물 거주자의 오염에 따른 예상 사상률을 거의 0%에 가까운 수준까지 저감할 수 있다고 보고하고 있다. 이외에도 건물에 적용할 수 있는 다양한 기술이 있는데, 주로 열, 저온, 건조, 항균, 광촉매, 오존 등의 물리적·화학적 현상과 정전기, 음이온화, 초음파, 펄스 백색광, 펄스 필터광, 펄스 전기장, 감마 방사, 전기빔 등 전자기장 및 관련 현상을 이용한 기술이 보고되고 있다. 전자기장을 이용한 소독은 빠른 처리가 가능하나 비용이 큰 단점이 있으며, 오존, 감마선 처리 등은 이용 과정에서 유해물질에 노출될 가능성이 있다. 환경성질환/공기감염 대응 건물 공조 기술의 장단점을 비교하여 표 5에 나타냈다(홍진관, 2008).

표 5. 환경성질환 공기감염 대응 건물 공조 기술의 장단점 비교

기 술	적용분야	장 점	단 점
열소독(thermal disinfection)	배출공기 (sewage air) 처리	간편하고 효과적임	비용이 큼
초저온 냉동(cryogenic freezing)	음식물 소독	간편함	비용이 크고, 일부 미생물종은 생존함
건조(desiccation)	공기청정	건조 또는 제습 시스템에 의한 자연적 현상	공기소독만으로는 비용 효과적이지 않음
수동 태양광 노출 (passive solar exposure)	공기와 표면 소독	무료임	과정이 느리고, 항상 적용 가능한 것은 아님
항균성 코팅(antimicrobial coatings)	필터 표면 보호	미생물 증식을 방지함	제거 효과가 불명확함
정전기 필터(electrostatic filters)	공기청정	필터 효율 증대, 먼지 제거	에너지 소비 증대, 습도에 민감함
음이온화(negative ionization)	먼지 제거	간편하고 비용이 적음	부분적으로만 효과가 있음
초음파(ultrasonication)	수처리	타 기술 효과를 향상시킴	비용이 크고, 공기 중 효과가 불명확함
광촉매 산화(photocatalytic oxidation)	공기청정	생물학적 및 화학적 오염물을 제거함	비용이 크고, 발생기작이 불명확함
오존 소독(ozone air disinfection)	공기청정, 소독	간편하고 효과적이며 비용이 낮음	오존 노출이 가능함
펄스 백색광(pulsed white light)	공기청정	빠른 소독	비용이 큼
펄스 필터광(pulsed filtered light)	공기청정	빠른 소독, 자외선보다 덜 위험함	비용이 큼
펄스 전기장(pulsed electric fields)	공기청정, 음식 소독	빠른 소독	비용이 큼
감마 방사(Gamma irradiation)	공기청정, 소독	미생물 처리에 효과적임	위험하고 비용이 큼
전기 빔(electron beams)	공기청정, 감염	미생물 처리에 효과적임	비용이 큼

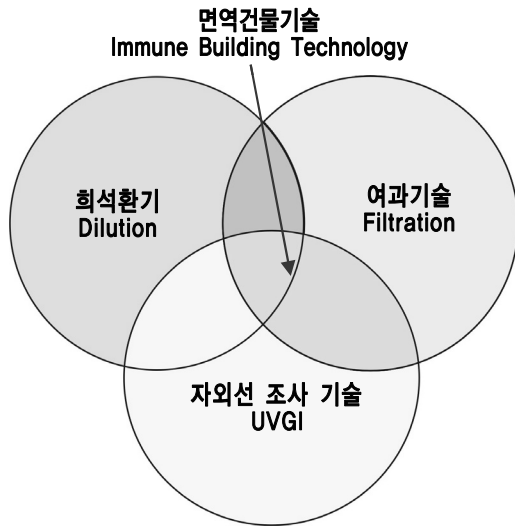


그림 4. 면역건물 기술의 3요소

미국에서는 2001년 911 테러 이후 면역건물 (immune building) 기술을 바이오테러에 대한 대응 방안으로 고려하여 연구를 수행하고 있다. 미국 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)의 CDC(Centers for Disease Control and Prevention)에서는 공기 중 화생방 공격으로부터 건물환경을 보호하기 위한 가이드라인과 건물환경을 보호하기 위한 여과 및 공기청정 시스템에 대한 가이드라인을 만들어 보급하고 있다. The Pennsylvania State University에서는 생물학적 및 화학적 무기로 부터 건물을 보호하는데 사용될 수 있는 시스템의 설계, 시공 및 유지관리에 대한 ‘면역건물 시스템 기술’ 정보를 정리하여 책으로 출판하였고, 고층 건물 모델에 대하여 그림 4에 나타난 3가지 대표적인 면역건물 기술(희석환기, 여과, UVGI)을 적용하여 5가지 생물학적 무기에 대한 이들 기술의 유효성을 검토하였다.

미국의 우수연구센터(COE, Center of Excellence) 가운데 Airliner Cabin Environment Research(ACER)는 항공기내 실내환경에 관한 전반적인 연구를 수

행하고 있다. 어번(Auburn), 퍼듀(Purdue), 하버드(Harvard), 보이즈(Boise State), 캔사스(Kansas State), 캘리포니아 버클리(University of California Berkeley), 뉴저지대학 등 7개 핵심대학이 컨소시엄을 이루고 있다. 퍼듀대학 Chen 교수팀에서는 항공기내 공조 방식에 관한 연구를 수행하고 있다.

태국 Center for Disease Control and Prevention의 Olsen 박사는 SARS 코로나 바이러스에 감염된 승객이 홍콩에서 베이징까지 3시간 사이 본인을 제외한 129명의 승객 중 16명에게 바이러스가 감염되었음을 보고하였다. 일본 동경대학생산기술연구소의 Kato and Ooka 연구실(http://venus.iis.u-tokyo.ac.jp/kato_ooka.html) 에서는 썬덜마네킨(thermal manikin)을 이용하여 재실자의 호흡에 의한 유동변화를 PIV 실험과 수치해석적 방법으로 연구하고 있다. 호주 Queensland University of Technology에서는 호흡에 의해 발생하는 입자의 크기에 대한 연구를 위해 EDIS(expiratory droplet investigation system)을 이용하여 실제 호흡 및 기침 등에 의해 방출되는 입자를 측정하는 연구를 하고 있다. 홍콩 Hong Kong Polytechnic University에서는 전산유체역학 시뮬레이션을 이용하여 호흡에 의한 사람 사이의 영향에 대한 해석 및 기존 연구와의 비교 실험을 수행하고 있다.

최근 국내에서도 한국철도기술연구원과 연세대에서 공기감염 예방기술을 개발하기 위한 기초 연구로 인체 토출 비말의 속도 측정 및 모사장치 개발 등의 연구를 시작하고 있다.

5. 맺음말

산업의 발전과 생활환경의 변화에 따라 삶의 편리성은 향상되었지만, 이에 반해 생활공간의 실내 공기질은 나빠져 환경성질환인 천식, 아토피 피부염, 알레르기 비염의 환자가 증가하는 추세이다.

즉, 2002년 대비 2006년 알레르기 비염 환자는 35.6%, 천식 환자는 16.6% 증가하였고, 특히 저항력이 낮은 9세 이하인 아동의 진료비율은 천식의 경우 5명 중 1명(19.6%), 아토피 피부염의 경우 9명 중 1명(11.4%), 알레르기 비염의 경우 6명 중 1명(16.3%)으로 높다. 환경성질환으로 매년 650만명 이상이 진료를 받는 고통에 시달리고 있고(2006년 환자수 665만명), 환경성질환으로 인한 진료비가 지속적으로 증가하여(2006년 환경성질환에 대한 진료비는 2003년 대비 23.4% 증가함), 최근에는 매년 3,000억원 이상의 사회적 비용을 지출하고 있다(2006년 진료비 3,223억원). 실내 생활공간에서 바이오에어로졸은 환경성질환의 대표적인 원인물질로 간주되므로, 이들 유해물질의 노출 저감을 통해 환경성질환의 감염을 감소시켜 질병으로 인한 국민들의 고통과 사회적 비용(의료비)을 줄일 필요가 있다.

2009년 4월 미국 질병관리본부에서 처음으로 유명한 신종인플루엔자의 세계적 확산으로 인해 국내에서도 다수의 사망자가 발생하고, 일부 학교가 휴교하는 등 사회적 문제로 크게 부각되었다. 질병관리본부의 일반적 지침 이외에 신종인플루엔자의 전파를 방지할 수 있는 기술적 대응방안의 부재로 질병감염에 대한 우려가 심각한 수준이었다. 이러한 유행성 전염병은 주기적으로 발생하는 것으로 알려져 있으므로, 평소에 기술적 대응방안을 마련하여 향후 재난에 대비할 필요가 있다. 이러한 측면에서 환경성질환/공기감염 대응 건물 공조 기술은 다중이용 생활환경에서 신종 전염병에 대응할 수 있는 사회적 안전망의 기반이 될 것이다.

미래의 실내공기질 제어 기술은 바이오에어로졸과 나노입자(nanoparticles)가 주된 대상이 될 것이므로, 이에 대한 기술개발에 박차를 가하여 미래시장을 주도할 필요가 있다.

- 참고문헌 -

1. 김윤신, 노영만, 홍승철, 이철민, 전형진, 김종철, 조정현, 2002, 다중이용시설에서의 실내공기질 조사, 한국실내환경학회지, 제1권, 제2호, pp.144-155.
2. 권순박, 김창수, 2010, 국내외 공기감염 분야 연구동향, Particle and Aerosol Research, 제6권, 제2호, pp.81-90.
3. 노영만, 김윤신, 이철민, 김기연, 전형진, 김종철, 2006, 일부 선박에서 실내환경 유해인자의 분포실태, 한국실내환경학회지, 제3권, 제4호, pp.376-386.
4. 박철우, 윤영훈, 황정호, 2010, 바이오에어로졸에 대한 항균 기술의 현황과 발전 방향, Particle and Aerosol Research, 제6권, 제2호, pp.69-80.
5. 배귀남, 2002, 실내 공간의 미생물 오염 현황, 공기청정기술, 제15권, 제3호, pp.13-23.
6. 배귀남, 2008, 실내 미생물 대응 항균 기술, 설비/공조·냉동·위생, 제25권, 제4호, pp.50-58.
7. 배귀남, 2008, 자동차와 공기청정, 공기청정기술, 제21권, 제1호, pp.33-41.
8. 손종렬, 윤승욱, 김윤신, 노영만, 이철민, 손부순, 양원호, 이윤규, 최한영, 이진성, 2006, 국내 일부 학교 교실의 실내공기질 평가, 한국실내환경학회지, 제3권, 제1호, pp.54-63.
9. 심인숙, 김윤신, 이철민, 박연희, 2008, 병원내 공기 중 미생물 분포와 동정에 관한 연구 고찰, 한국실내환경학회지, 제5권, 제3호, pp.196-214.
10. 안상영, 김모근, 김옥순, 이용직, 나채근, 이춘우, 박재형, 2006, 경북도내 일부학교 교실의 실내공기질 평가, 한국실내환경학회지, 제3권, 제4호, pp.367-375.
11. 양원호, 이기영, 박경화, 윤충식, 손부순, 전준민, 이현수, 최옥희, 유승도, 한진석, 2009, 한국인의 평일 및 주말의 국소환경 시간활동 양상, 한

- 국실내환경학회지, 제6권, 제4호, pp.267-274.
12. 윤기영, 변정훈, 고병주, 박재홍, 김명운, 윤희승, 황정호, 2006, 무전해 은도금된 활성탄소섬유필터의 바이오에어로졸 저감 특성, 한국실내환경학회지, 제3권, 제2호, pp.141-149.
 13. 이병욱, 이윤하, 대장균 바이오에어로졸의 생명성 제어를 위한 가열튜브에 관한 연구, Particle and Aerosol Research, 제1권, 제1호, pp.39-45.
 14. 이철민, 김윤신, 김기연, 김종철, 전형진, 2007, 국내 부유미생물에 관한 연구 동향, 한국실내환경학회지, 제4권, 제1호, pp.59-71.
 15. 이치원, 이종대, 전용택, 손부순, 2006, 충남지역 일부 다중이용시설에서 Bioaerosol의 농도에 관한 연구, 한국실내환경학회지, 제3권, 제1호, pp.45-53.
 16. 전준민, 정만호, 이학성, 강병욱, 학교 교실내 실내유해오염물질 분포 특성, 한국실내환경학회지, 제7권, 제1호, pp.47-61.
 17. 홍진관, 2008, 면역 건물 기술(Immune Building Technology), 설비/공조·냉동·위생, 제25권, 제4호, pp.40-49.
 18. 환경부, 한국환경산업기술원, 2010, 환경기술 동향보고서 - 환경융합기술(Converging technology)을 접목한 신개념 실내환경(IEQ) 관리시스템.
 19. 황정호, 윤기영, 변정훈, 박재홍, 박철우, 2007, 은나노 입자가 코팅된 항균 필터를 이용한 바이오에어로졸 제어 기술, 공기청정기술, 제20권, 제1호, pp.57-65.
 20. Andersen, I., 2008, Before the big bang of indoor climate research, Indoor Air 2008, August 17-22, Copenhagen, Denmark, Paper ID: Su17K1.
 21. Godish, T., 2001, Indoor Environmental Quality, Lewis Publishers.
 22. Grinshpun, S. A., Adhikari, A., Lee, B. U., Trunov, M., Mainelis, G., Yermakov, M., and Reponen, T., 2004, Indoor air pollution control through ionization, pp.689-704, In Brebbia, C. A. (ed.), Air Pollution XII, Wessex Institute of Technology Press, Southampton, U.K.
 23. Korhonen and Lintunen, 2003, The good indoor air, Like Publishing Ltd., p.15.
 24. Krzyzanowski, M., 2008, Development of WHO guidelines on indoor air quality, Indoor Air 2008, August 17-22, Copenhagen, Denmark, Paper ID: Tu9K1.
 25. Lee, K. S., Black, W., Brauer, M., Stephens, G., Teschke, K., Hsieh, J., and Bartlett, K., 2002, A field comparison of methods for enumerating airborne fungal bioaerosols, Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (Indoor Air 2002), Monterey, CA, USA, June 30 - July 5, Vol. 1, pp.455-460.
 26. Lee, Y. H. and Lee B. U., 2006, Inactivation of airborne *E. coli* and *B. subtilis* bioaerosols utilizing thermal energy, Journal of Microbiology and Biotechnology, Vol. 16, No. 11, pp.1684-1689.
 27. Park, S. J. and Jang, Y. S., 2003, Preparation and characterization of activated carbon fibers supported with silver metal for antibacterial behavior, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 261, pp.238-243.
 28. WHO, 2006, Health risks of particulate matter for long-range transboundary air pollution.