

바이오에어로졸에 대한 기계공학적 연구

홍성결 UNIST 기계 및 신소재공학부 대학원생 | e-mail : miffy0691@unist.ac.kr

장재성 UNIST 기계 및 신소재공학부 부교수 | e-mail : jjang@unist.ac.kr

이 글에서는 바이오 에어로졸(대표적인 예로서 공기 중의 박테리아 혹은 바이러스와 같은 공기 중의 미생물 입자들 수 있다)의 기본적인 연구에 대해 기계공학적인 관점에서 소개하고자 한다.

바이오에어로졸(Bio-Aerosols)은 기체상의 미생물이나 생물에서 발생한 기체상의 모든 물질을 가리킨다. 예를 들어 살아있거나 죽은 미생물(박테리아, 바이러스), 미생물 부스러기, 곰팡이포자, 꽃가루, 동식물에서 발생한 알레르기 물질, 사람의 몸에서 나온 기침 및 체액, 그리고 미생물에서 발생한 독소 등을 포함한다. 바이오에어로졸은 자연에 무한히 많으며 존재하는 곳도 집 안과 밖, 건물 내부 및 외부, 그리고 동식물의 거주지 등등 다양하다. 또한 그 크기도 1 마이크로보다 작은 크기에서 100 마이크로까지 아우르고 있다.

이와 같은 바이오에어로졸은 다양한 질병의 원인 물질이기도 하다. 예를 들어, 얼마 전 세계적으로 유행했던 신종 인플루엔자 바이러스, 또 전국의 한우 및 돼지 농가에 퍼졌던 구제역 바이러스, 사스(SARS: Severe Acute Respiratory Syndrome) 바이러스, 결핵 및 홍역 바이러스, 또한 천식의 원인물질중의 하나로 알려진 곰팡이 등등 바이오 에어로졸은 우리의 일상생활에서 가벼운 증상에서부터 심각한 호흡기 질환까지 다양한 질병을 유발하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 바이오에어로졸에 의한 질병의 전파는 질병에 전염된 숙주 동물로부터의 체액에 의한 직접 감염에 의한 것도 있지

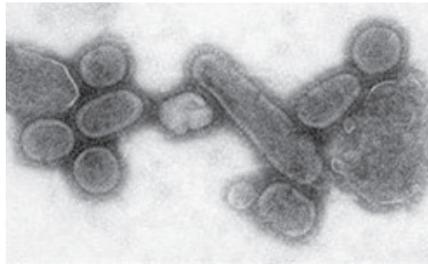


그림 1 신종인플루엔자 바이러스(왼쪽)와 구제역 바이러스(오른쪽)

만, 이 체액이(공기 중에서의 증발로 인한 바이오에어로졸 입자의 크기 감소로 인하여) 지상으로 바로 떨어지지 않고 먼 거리까지 공기 중으로 이동하여 숙주 동물을 전염시킴으로써 이루어지기도 한다. 예를 들어 구제역 바이러스는 발생 장소로부터 심한 경우 수백 km 떨어진 곳의 소들도 전염시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 2~5 마이크로 크기의 아주 작은 바이오에어로졸 입자는 폐의 하부 안쪽까지 침입하여 감염시키기도 한다. 이와 같이 바이오에어로졸에 의한 질병은, 병이 전파되는 경로의 성격상 다른 동물로의 전염이 아주 빨리 이루어지므로 바이오에어로졸에 대한 연구 및 진단은 그 중요도가 지대하다고 할 수 있다. 그리고 바이오에어로졸의 연구 특성상 기계공학, 환경공학, 미생물학 등의 다학제간의 연구이지만 여기서는 기계공학적인 관점에서 더 얘기하고자 한다.

바이오에어로졸의 연구 분야와 국내외 연구 동향

현재 바이오에어로졸에 대한 연구는 크게 바이오에어로졸 발생, 바이오에어로졸 채집, 바이오에어로졸 감지, 바이오에어로졸 제어, 그리고 바이오에어로졸에 대한 생물학적 기초 연구 등으로 나눌 수 있으나 이 모든 분야가 실은 서로 유기적으로 밀접히 연관되어 있다. 아래에 각 연구의 기본적인 개요 등을 소개하겠다.

바이오에어로졸 발생에 대한 연구로는 바이오에어로졸의 발생장치의 설계 및 제작, 발생장치에서 얻어진 바이오에어로졸의 생물학적 안정성, 발생된 바이오에어로졸 입자의 전하량 및 크기 분포도 그리고 이들 입자의 시간에 대한 변화율과 같은 발생된 입자의 여러 특징, 발생 메커니즘에 대한 연구를 진행한다. 현재 바이오에어로졸 연구의 주요 그룹에 의해 가장 많이 쓰이는 발생장치들 중의 몇 개를 들자면(3 hole) 충돌식 분무기(Collision Nebulizer)와 전기분사 에어로졸 생성기(Electrospray Aerosol Generator)를 들 수 있다. 이들 장치의 개요와 특징을 들자면, 충돌식분무기는 우선 압축공기를 이용하여 입자가 포함된 액상의 용액으로부터 베르누이의 원리에 따라서 용액을 끌어올리고, 압축공기가 끌어올려진 입자가 포함된 용액과 충돌하여 미세 입자를 공기 속으로 뿜어낸다. 이 장치는 가격이 저렴하고 사용하기 편한 장점이 있으나 시간에 따라서 입자들의 크기 분포도가 달라지고 1 마이크로 이하의 초미세 입자를 발생시킬 때에는 비슷한 크기의 바이오 오염물질도 같이 만들어내는 단점이 있다. 또 다른 장치로는 전기분사 에어로졸 생성기가 있는데 이 장치는 입자가 포함되어 있는 전도성 용액으로부터 전기장을 이용하여 입자가 포함되어 있는 액적을 아주 미세한 크기로 발생시키고 건조과정과 +/- 전하의 대전과정을 거쳐 우리가 원하는 전하량과 크기의 미세 입자를 발생시킨다. 이 장치는 사용자가 숙련되기 전까지 어느 정도의 훈련이 필요하고 발생하는 양이 상대적으로 적으며 그리고 사용되는 용액의 전기적인 측면에서 제약이 가해

질 수 있는 단점이 있으나, 발생하는 바이오에어로졸 입자들의 크기가 비교적 균일하며, 그리고 발생한 미생물 입자의 생물학적 생존가능성이 더 커질 수 있는 장점이 있다.

바이오에어로졸의 채집과 관련된 연구는 공기 중의 미생물 입자를 우리가 원하는 곳에 모으는 것에 관련된 연구로서 채집과정에서 발생하는 바이오에어로졸의 안정성 연구, 즉 미생물 입자의 생존 여부와 이 미생물이 숙주를 전염시킬 수 있을지의 여부에 관한 연구, 그리고 이 미생물이 배지에서 자랄 수 있는지에 관한 문제, 그리고 바이오 에어로졸의 크기 및 전하량 분포도에 따른 물리적/생물학적 채집 효율 문제 등을 연구한다. 이것은 공기 중의 미생물 입자의 진단과정과도 결부되어 중요하다고 할 수 있다. 현재까지 많이 사용되는 채집 장치는 크게 네 가지 유형으로 나눌 수 있는데 솔리드 임팩터(Solid Impactors), 리퀴드 임핀저(Liquid Impingers), 필터, 그리고 전기식 채집기로 나눌 수 있다. 이에 대한 자세한 내용은 다음 섹션에서 다룰 것이다.

바이오에어로졸 감지와 관련된 연구는 채집된 바이오에어로졸 입자들로부터 채집된 바이오 입자가 어떤 바이오 물질인지를 알아내는 연구를 말한다. 여기에는 채집된 입자를 액체상을 거쳐서 알아내는 기술과 액체상을 거치지 않고 기체상에서 직접 알아내는 것으로 나눌 수 있다. 바이오에어로졸 입자들을 액체상에서 채집하고 난 다음 어떤 바이오 물질인지를 알아내는 기술로는 기존의 바이오 물질 감지기술이 사용 가능하다. 이 기술들로는 배양(culture)에 의한 방법, 중합효소연쇄반응(PCR: Polymerase chain reaction)에 의한 방법, 유동세포계수법(Flow cytometry) 그리고 면역분석(Immuno Assay)에 의한 방법 등을 들 수 있다. 또한 바이오에어로졸의 감지 외에도 바이오에어로졸의 총량과 살아있는(혹은 전염성이 있는) 바이오에어로졸만의 양을 측정하기도 한다. 기존의 감지 기술 외에도 최근에 많은 발전을 이루고 있는 그리고 미세 제작기술

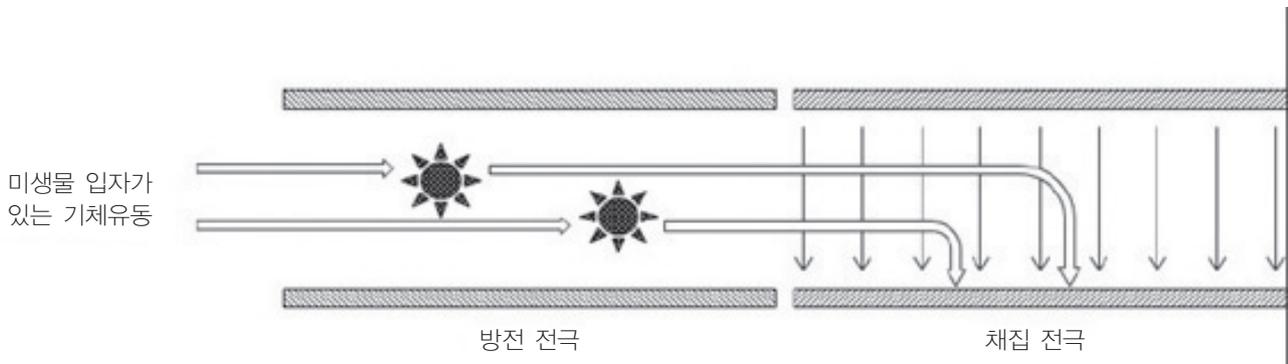


그림 2 전기식 채집기의 개략도 : 채집기 속으로 들어오는 바이오 입자를 방전전극으로 전하를 띠게 만들고 이 전기를 띤 입자들을 채집전극에서 전기장을 이용하여 채집하는 방식이다.

(microfabrication, MEMS)을 이용한 미세 바이오센서로 측정하는 방법도 최근 연구되고 있다.

채집기를 통해 채집을 하지 않고 기체상에서 직접 바이오 에어로졸 물질에 대해 감지하는 기술로는 UVAPS(Ultra-Violet Aerodynamic Particle Sizer)와 바이오 에어로졸 질량분석법(BAMS: Bio-Aerosol Mass Spectrometry)을 들 수 있다. 그러나 이 두 기술들은 주로 기체상의 일부 박테리아 물질에만 사용되고 있고 바이러스와 같은 초미세 입자에는 아직 사용되고 있지 않다. 또한 UVAPS는 살아있는 미생물의 양은 측정이 가능하나 미생물이 어떤 것인지 즉 바이오에어로졸 감지에는 아직 사용되지 않고 있다.

바이오에어로졸의 제어에 관한 연구는 바이오에어로졸의 감지나 그 양을 측정하기보다는 바이오에어로졸 물질을 죽이거나 전염성을 제거하는 연구이다. 진단이 필요 없는 곳에서는 이와 같은 방법이 많이 사용되고 있다. 이에 사용되는 방식으로는 자외선을 이용하는 방법, 오존을 이용하는 방법, 이온을 이용하는 방법, 열을 이용하는 방법, 높은 전기장을 이용하는 방법 등이 사용되고 있다.

바이오에어로졸의 효과적인 채집

바이오에어로졸의 채집은 바이오에어로졸의 진단 및

감지에 필요한 첫 번째 작업이며 신속하고도 정확한 진단을 위해 매우 중요한 단계이다. 바이오에어로졸의 채집 방법에는 크게 솔리드 임팩터, 리퀴드 임핀저, 필터, 그리고 전기식 채집기를 들 수 있다.

리퀴드 임핀저는 바이오에어로졸 입자가 포함된 공기를 노즐 사이로 통과시키고 액체 속으로 가속시켜서 채집하는 방식이다. 이 방식은 가장 많이 사용되는 채집 형태중의 하나이고 채집 시에 바이오 입자의 손상이 적은 장점이 있으나 바이러스입자와 같은 초미세 입자에 대해 채집효율이 낮고, 채집 시에 에어 버블(air bubble)에 의해 버블 속에 채집된 입자들이 다시 공기 중으로 퍼질 수 있는 단점이 있다. 또한 상대적으로 높은 압력손실이 발생하기도 하다. 이런 형태의 채집방식은 AGI-샘플러(AGI-Samplers)나 바이오 샘플러(BioSamplers)와 같은 장치에서 실제 사용되고 있다.

이에 비해 Solid impactor 형태는 바이오에어로졸 입자가 포함된 공기를 배지(culture medium)가 있는 고체 표면에 가속시켜서 채집하는 방식이다. 이로 인하여 다양한 크기의 입자들의 분리가 가능하고 상대적으로 큰 입자에 대해 채집효율이 큰 장점이 있다. 하지만 바이오에어로졸 채집 시에 높은 운동량으로 인하여 바이오입자의 손상이 상대적으로 크고, 크기가 작은 초미세 입자에 대해서는 채집효율이 상대적으로 작은 단점이 있다. 이런 형태의 채집방식은 앤더슨 샘플러

(Anderson Samplers), 슬릿 샘플러 (Slit Samplers), 사이클론 등에서 사용되고 있다.

필터형 채집기는 바이오 입자의 운동량과 브라운 운동 두 가지 메커니즘이 동시에 작용하여 채집하는 방식으로 일반적으로 많이 사용하고 있다. 이런 형태의 채집기는 거의 모든 크기의 입자에 대해서 채집효율이 높은 장점이 있는 반면 압력손실이 상대적으로 크고, 공기 중의 바이러스 채집 시에 바이러스 입자에 미치는 손상이 커서 배양 방법과는 대체로 같이 사용하지 않는다.

전기식 채집기는 채집기 속으로 들어오는 바이오 입자를 코로나 방전기(corona discharger)로 전하를 띠게 만들고 이 전기를 띤 입자들을 전기장을 이용하여 채집 전극에서 채집하는 방식이다(그림 2). 이와 같은 방식의 채집기는 초미세(submicron) 입자를 포함한 거의 모든 크기의 입자에 대해서 채집효율이 높은 장점이 있으나 전하를 띠게 하는 코로나 방전기 사용 시에 오존(Ozone) 등이 발생하는데 이로 인해 바이오에어로졸 입자의 생물학적 능력에 나쁜 영향을 미치는 단점이 있다. 이는 미생물 입자의 진단 시 잘못 측정하게 되는 단점이 있다.

전기식 채집기를 이용한 미생물 입자의 효율적인 채집을 위해서는 전기식 채집기의 설계 단계에서 유체역학적, 전기공학적 접근이 필요하다. 우선 전극의 위치와 입구 출구의 위치에 따른 대략의 채집기 형태에

대해서 질량에 대한 연속방정식, 나비에 스톱스 운동방정식, 전하량 보존 법칙 등을 사용하여 채집기 내부의 유동장과 전기장을 구한다. 여기에서 미생물 입자의 농도가 작다는 가정 하에서 미생물 입자에 대해 뉴턴의 법칙을 적용하면 가속도를 구할 수 있다. 여기에서 입자에 미치는 힘들은 크게 중력, 브라운 운동에 의한 힘, 전기장에 의한 입자의 전하에 미치는 전기력, 유체에 의한 부력, 초미세 입자의 영향을 고려한 유체역학적인 항력(drag force)으로 이루어져 있다. 이 가속도로부터 적분을 두 번 거쳐 미생물 입자의 위치 정보 즉 입자의 궤적을 구한다. 이 입자들의 궤적으로부터 원하는 위치로의 채집여부를 판단할 수 있다. 이와 같은 과정은 채집 효율의 크고 작음에 따라 여러 번 진행되기도 한다. 이처럼 입자의 궤적은 여러 가지 힘에 의해 좌우되고 또한 이 힘들은 입자의 크기, 전하량, 입자의 밀도, 유체의 밀도, 점도, 전극의 위치, 입구와 출구의 위치, 유량 등 다양한 인자에 의해 좌우된다. 이에 적절한 시뮬레이션을 거쳐 채집기에 대한 최적의 조합을 찾아내는 것이 필요하다. 또한 미생물 입자의 진단을 위해서는 가능한 한 많은 입자를 단시간 내에 채집해야 하므로 이 입자들의 농도를 높이는 것도 중요하다 할 수 있다. 이는 바이오 에어로졸의 농도가 대체로 작은 것을 고려할 때 꼭 필요한 작업이다.



기계용어해설

구동 래칫 장치(Running Ratchet Train)

원주상에 톱니모양 또는 그것과 유사한 형의 노치를 갖추고, 다른 링크의 왕복운동 또는 요동운동에 의하여 간헐적인 회전운동을 하는 장치.

셀렉티브 기어(Selective Gear)

1개의 축에 나란히 장치된 기어의 치수가 서로 다른 일군의 기어 중 선택적으로 맞물려 여러 가지 다른 속도비를 얻는 데 쓰이는 기어.

자동중심조정 베어링(Self Aligning Bbearing)

베어링 본체의 일부에 구면 시트를 갖춘 것으로, 축의 경사에 따라 자유롭게 베어링면의 방향을 바꿀 수 있는 베어링.

자경성(自硬性), 공기담금질성(Self-hardening)

니켈, 크롬, 망간 등이 함유된 특수강에서 볼 수 있는 현상으로, 담금질 온도에서 대기 속에 방랭하는 것만으로도 마텐자이트 조직이 생성되어 단단해지는 성질.