

바이오에어로졸 측정 기술

윤기영 · 변정훈 · 박재홍 · 황정호* | 연세대학교 기계공학부
연구원 · 정교수*

E-Mail : hwangjh@yonsei.ac.kr*

1. 서론

바이오에어로졸(bioaerosol)이란 공기 중에 부유하는 미세한 입자상 물질 중 생명성의 특징이 있는 것, 즉 생명체이거나 또는 생명체로부터 기원된 것을 의미한다. 실내 공기 중에 존재하는 바이오에어로졸에는 바이러스, 박테리아, 곰팡이, 진드기, 꽃가루 등이 있다. 바이러스의 경우 0.02~0.3 μm , 박테리아의 경우 0.3~10 μm , 곰팡이 포자의 경우 0.5~30 μm 정도이며, 꽃가루의 경우 10~100 μm 정도의 크기를 가진다.⁽¹⁾

바이오에어로졸의 행동특성은 일반 대기 에어로졸이 갖는 물리적 특성뿐만 아니라 바이오에어로졸이 갖는 생물학적 특성에 의해서도 결정된다. 기본적으로 바이오에어로졸도 에어로졸의 일부분이기 때문에 이들의 행동특성은 일반적인 물리적 특

성 즉 입자크기, 브라운 운동, 중력침강, 전기적 특성, 확산 등의 영향을 받게 되고, 이러한 특성은 인체의 어느 부위에 얼마만큼이 침착 될 수 있는지에 영향을 미친다. 또한, 바이오에어로졸은 주로 탄수화물, 단백질, 핵산, 인지질막 같은 물질로 구성되어 있고, 이러한 물질은 친수성으로서 주변 환경의 온도나 상대습도에 의해 입자 크기나 형태의 변형이 가능하기 때문에 인체에 침투되는 경우 소수성(비친수성)입자에 비해 침강속도나 침착부위가 달라질 수 있는 특성도 역시 가지게 된다.

이들 바이오에어로졸은 고양이, 개 등의 동물, 카펫, 사람, 가습기, 냉장고, 공기청정기 등에서 발생되며, 실내 환경조건에 따라 더욱 증가되어 전염병을 매개시키는 역할을 하거나 직접적으로 피부 질환, 알레르기성 질환, 기관지 천식 등을 유발시킨다. 이러한 바이오에어로졸의 인체 유해성으로 인해

표 1. 바이오에어로졸 크기와 배경 농도

바이오 에어로졸의 종류	크기 (μm)	농도 ($\#/m^3$)
바이러스 (virus)	0.02~0.3	-
박테리아 (bacteria)	0.3~10	0.5~1,000
곰팡이 포자 (fungal spores)	0.5~30	0~10,000
꽃가루 (pollen)	10~100	0~1,000

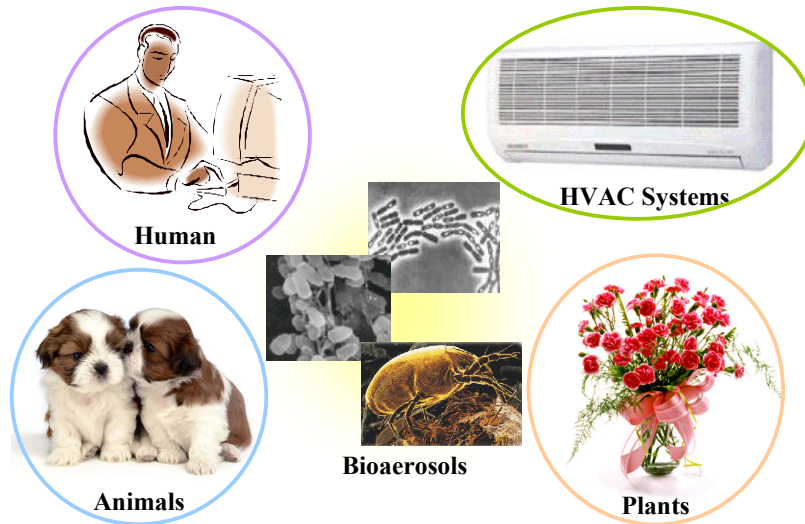


그림 1. 실내 바이오에어로졸 오염원

2004년 5월 30일 시행된 환경부의 “다중이용시설 등의실내공기질관리법”에서는 의료기관, 보육시설, 노인의료시설, 산후조리원 등에서 바이오에어로졸의 농도를 $800\text{CFU}/\text{m}^3$ 이하로 유지하도록 하고 있다.⁽²⁾

바이오에어로졸 측정의 목적은 오염원을 파악하여 효과적인 제어대책을 수립하고 바이오에어로졸과 건강상태의 인과관계를 밝히는데 있다. 본 글에서는 바이오에어로졸의 측정 기술에 대해 소개하고자 한다.

2. 바이오에어로졸 측정 기술

공기 시료 채취기를 이용해서 일정 시간 동안 미생물을 채취하고, 배양법 등의 분석을 통해 미생물의 존재 유무와 특정 바이오에어로졸의 농도 또는 전체 바이오에어로졸의 농도에 대한 정보를 얻을 수 있다. 바이오에어로졸의 측정에서는 다음 3가지를 고려해야 한다. 첫째, 도입부로부터의 입자 채취

효율이다. 특히, 공기가 일정하게 흐르는 경우 공간 내 입자의 농도분포를 정확하게 측정하기 위해서는 등속 샘플링(isokinetic sampling)을 해야 한다. 둘째, 채취기 내에서의 입자 채취효율이다. 채취기의 채취효율은 입자가 흐르는 공기의 유선으로부터 분리되어 채취부에 얼마나 잘 부착되는가에 좌우된다. 이것은 바이오에어로졸의 특성에 관계없는 채취기 고유의 성능이다. 셋째, 채취된 바이오에어로졸은 적당한 조건에서 배양된 후 분석하므로, 바이오에어로졸의 생존성(viability)과 생물학적 운동성(biological activity)을 고려하여 채취하여야 한다.

2.1 바이오에어로졸 샘플링 방법

바이오에어로졸의 샘플링 방법에는 충돌법, 세정법, 여과법 등이 있다.^(3,~4)

2.1.1 충돌법

충돌법은 바이오에어로졸의 채취에 있어 가장 일반적으로 사용되는 방식이다. 임팩터(impactor)는

표 2. 부유세균 측정법

측정법		측정기기	기기구성	소모품 및 기구
충돌법	Impaction법	Impactor 방식의 포집장치	유량계 펌프(모터)	한천배지 페트리 디쉬 세균배양기
세정법	Impinger법	Impinger 방식의 포집장치	유량계 펌프(모터) 완충액 탱크	완충액(액체배지) 멤브레인 여과지 한천배지 페트리 디쉬 세균배양기
여과법	Filtration법	Filtration 방식의 포집장치	홀더(Holder) 유량계 펌프(모터)	젤라틴 여과지 한천배지 페트리 디쉬 세균배양기

에어로졸의 형태로 존재하는 입자를 공기역학적 입경(aerodynamic diameter)에 따라 크기별로 분리해내는 장치이다. 입자가 부유해 있는 공기가 노즐을 통해 가속되어 충돌판에 충돌하면, 입자가 갖는 관성에 따라 관성이 작은 입자는 급격한 유동의 변화에도 잘 적응하여 충돌판에 충돌하지 않지만, 관성이 큰 입자는 유선에서 이탈하여 충돌판에 부딪혀서 채취된다. 임팩터의 채취효율은 주어진 입자의 크기에 대해 노즐을 통해 유입되는 입자의 개수에 대한 충돌판에 의해 제거되는 입자 개수의 비로

주어진다. 채취효율을 입경에 대한 함수로 표현하는 것은 임팩터의 특성을 나타내는데 필수적이다. 이때 50%의 채취효율을 나타내는 입경(dp50)을 분리입경(cut-off diameter)이라고 하며, 임팩터를 설계할 때 목표값이 된다.

임팩터를 다단으로 설계하여 상층에서 입경이 큰 입자부터 분리할 경우, 입경별로 에어로졸을 채취할 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 공기 중에 존재하는 바이오에어로졸의 수농도를 입경별로 측정하는 것이 가능하다.

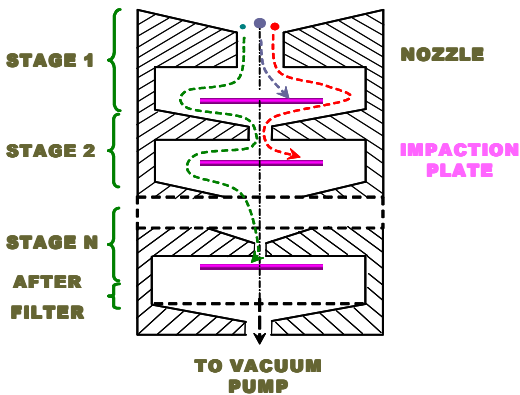


그림 2. 다단 임팩터의 원리

표 3. 바이오에어로졸 채취용 6단 임팩터 사양

Stage	Nozzle Diameter (mm)	Range (μm)	Remarks
1	1.18	7.0 이상	Each plate : 400 nozzles
2	0.91	4.7 - 7.0	
3	0.71	3.3 - 4.7	
4	0.53	2.1 - 3.3	Flow rate : 28.3 L/min (1 ft ³ /min)
5	0.34	1.1 - 2.1	
6	0.25	0.65 - 1.1	

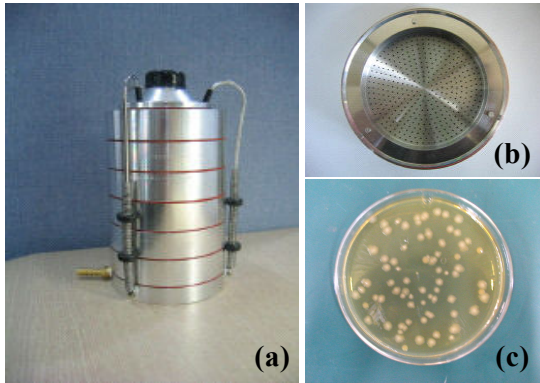


그림 3. (a) Impactor 외형,
(b) Impactor 노즐 형상,
(c) 충돌법에 의한 시료 채취 예

바이오에어로졸을 채취하기 위해 사용하는 임팩터의 경우, 충돌판으로 미생물이 성장하는 데에 필요한 한천 배지가 포함된 페트리 디쉬를 사용할 수 있도록 설계한다. 환경부의 “실내공기질공정시험방법”에서는 카제인대두소화한천배지(casein soybean digest agar)를 사용하도록 하고 있다.⁽³⁾

2.1.2. 여과법

여과법은 섬유상 혹은 멤브레인 필터를 사용하여 바이오에어로졸을 유동으로부터 채취하는 방식으로, 필터 여재에 의한 채취 방법은 미생물뿐만 아니라 일반 대기입자의 채취에 일반적으로 많이 이용되는 방법으로 간단하며 이용범위가 넓고 경제적인 방법이다. 입자는 주로 관성(impaction)이나 차단(interception) 등에 의해 채취된다.

필터 여재를 이용한 방법은 채취과정에서 심한 탈수현상으로 미생물의 생존율이 낮아질 수 있다. 따라서 필터를 이용한 방법은 대개 진균류와 탈수 작용에 저항성이 있는 박테리아를 채취할 경우에 사용한다. 채취 기간동안 충분한 양의 바이오에어

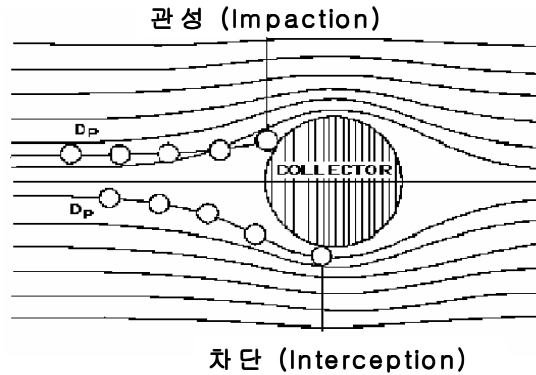


그림 4. 필터 여과법 원리

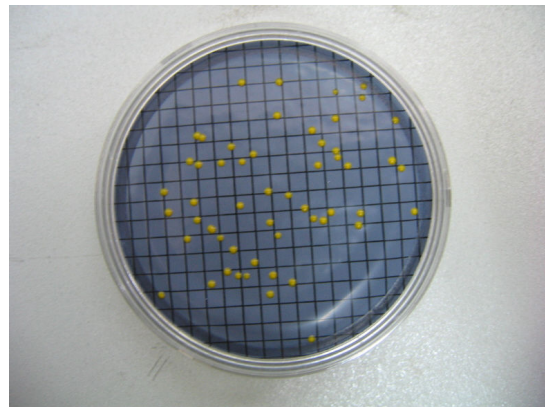


그림 5. 여과법에 의한 바이오에어로졸 채취 예

로졸을 포집하기 위해서는 여과지가 건조되어 바이오에어로졸의 생존에 영향을 주지 않아야 하며, 환경부의 “실내공기질공정시험방법”에서는 미생물이 여과 기간 동안 열과 압력으로부터 견딜 수 있는 젤라틴 여과지를 사용하도록 하고 있다.⁽³⁾

2.1.3. 세정법

임핀저(Impinger)법이라고도 하며, 일정량의 공기를 흡입하여 장비에 연결된 완충액이 들어있는 장치를 통과시켜 공기 중의 바이오에어로졸을 채취



그림 6. 세정법에 사용되는 임핀저(Impinger)

하는 방식이다. 바이오에어로졸이 채취된 이 완충액을 전량 여과하고, 이 여과지를 배지 위에 놓고 배양하여 바이오에어로졸을 측정하게 된다. 세정법으로 채취하면 채취과정에서 일어나는 탈수현상을 방지할 수 있다는 장점이 있지만, 강한 제트 유동과 난류에 의한 전단력(shear force)으로 인해 바이오에어로졸의 생존력이 저하된다는 단점이 있다. 환경부의 “실내공기질공정시험방법”에서는 완충액으로 카제인대두소화액배지(casein soybean digest broth)를 사용하고, 여과지는 멤브레인 필터를 사용하도록 하고 있다.⁽³⁾

2.2 바이오에어로졸 분석 방법

2.2.1 배양법

바이오에어로졸 측정에 있어 채취된 시료를 분석하기 위해 가장 일반적으로 사용되는 방법은 배양법이다. 공기 중의 미생물은 실제 눈으로 확인할 수 없는 크기이다. 따라서 특정 온습도 조건에서 일정 시간동안 배양하여 눈으로 확인이 가능한 미생물 군집(colony)을 형성하도록 한다. 미생물 군집은 하나의 바이오에어로졸이 번식을 통하여 이룬 집단으로, 한 개의 군집은 채취 당시 한 개의 바이오에어로졸을 의미한다.

배양법을 통해 바이오에어로졸을 분석할 경우,

사용되는 단위는 CFU/m³이다. CFU(colony forming unit)는 배지 또는 필터 여재 위에 형성된 총 균집의 수를 의미하며, 이를 채취된 전체 공기의 부피로 나누어 CFU/m³을 계산하게 된다.

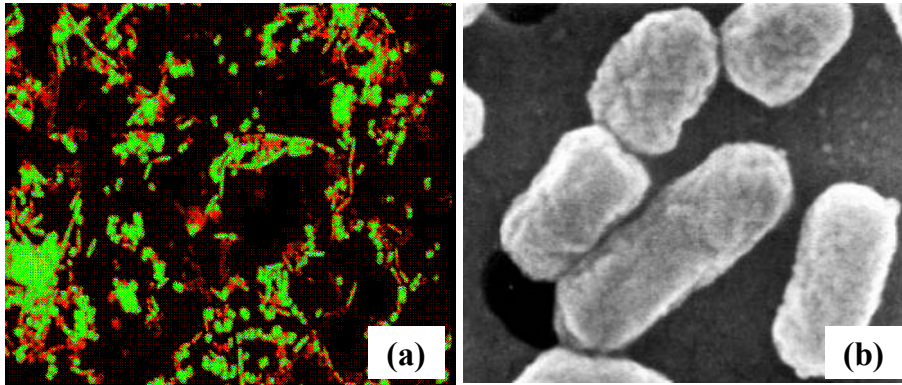
채취된 바이오에어로졸을 배양함에 있어 고려해야 할 사항은 배양 온도와 시간이다. 환경부의 “실내공기질공정시험방법”에서는 채취된 샘플을 30~35°C의 온도에서 48시간동안 배양하도록 하고 있다. 또한 배양 중 증식되는 미생물의 확산으로 인해 계수가 곤란할 수 있으므로 24시간 단위로 증식 상태를 관찰하고 균집을 수를 세어 놓도록 하고 있다.⁽³⁾

2.2.2 현미경법

현미경을 이용한 분석법에는 형광 현미경 분석법, 전자 현미경 분석법 등이 있다.^(5, 6)

형광 현미경 분석법은 자외선에 의한 형광 현상을 이용하는 분석법이다. 파장이 짧은 자외선을 시료에 비추면 형광을 발하는 원리를 이용하여, 시료에 형광물질(형광색소)을 처리한 후 관찰하는 방법으로 병원에서 면역검사에 많이 이용되고 있다. 자외선 발생장치와 광원필터를 사용하여 암실 또는 반암실 내에서 보통의 광학현미경에 의해 관찰하며, 개개의 시료에 따라서 적합한 형광색소를 선택한다. 또, 접안렌즈 위에 눈을 보호하기 위한 자외선 필터를 설치한다.

전자 현미경은 광원으로 가시광선 대신 파장이 더 짧은 전자광을 사용하는데, 0.2 μm 이하의 구조를 볼 수 있기 때문이다. 주사전자 현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)은 세포와 바이러스(보통 1,000~10,000배 확대)의 표면을 연구하는데 사용된다. SEM에서는 전자빔을 시료 위에 주사시켜서 시료로부터 나온 2차 전자를 모아서 검출한 후 여러 가지 과정을 거친후 CRT에서 영상화시키므로 보통 3차원 영상으로 나타나게 된다. 또한, SEM은



(a) 형광현미경

(b) 주사전자현미경(SEM)

그림 7. 현미경 분석 사진

단일 포자나 세포, 군집, 크기, 모양 등 미생물의 구조에 대한 정보도 알 수 있다. 투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM)은 얇은 세포내의 미세한 조직(보통 10,000~100,000배 확대)이나 바이러스를 연구하는데 사용되는데, 얇은 시편을 빔이 투과하여 관찰하므로 2차원적인 또는 단면적인 구조를 나타낸다.

2.2.3. 실시간 측정법 (UV-APS)

공기 중의 바이오에어로졸을 실시간으로 측정하기 위한 연구는 현재 많은 연구가들에 의해 진행되고 있으며 상용화된 장비로는 미국 TSI 사의 UV-APS가 있다.⁽⁷⁾

APS(Aerodynamic Particle Sizer)는 입자의 크기에 따른 관성력의 차이를 이용해 에어로졸의 입경 분포를 측정하는 장치이다. 질량이 큰 입자는 관성력이 크기 때문에 유동의 속도를 따라 가속되는 데에 오랜 시간이 걸리는 반면, 질량이 작은 입자는 짧은 시간 내에 유동의 속도를 따라 가속된다. 이러한 특성을 이용하여 부유 입자를 노즐 끝에서 가속시키고, 이 노즐 출구 부분에 일정한 간격을 유

지한 레이저빔이 지나가면서 빛을 산란시킨다. 이 산란된 빛은 집광장치에 의해 광센서에 모아지게 된다. 따라서 산란된 빛을 이용해 입자가 레이저빔 사이에서 체류한 시간을 알 수 있고, 이 시간을 이용해 입자의 공기역학적 입경(aerodynamic diameter)에 대한 정보를 얻을 수 있다. UV-APS는 이러한 공기역학적 입경을 측정하기 위한 레이저 빔 후단에 355nm 파장의 레이저를 조사하여 세포 조직 내부의 NADPH(nicotinamide adenine dinucleotide phosphate)라는 물질에서 형광 반응을 일으킨다. 이러한 형광 신호를 검출하여 일반 대기 입자와 바



그림 8. 바이오에어로졸 실시간 측정 장비 (UV-APS)

이오에어로졸을 구분할 수 있다.

3. 결론

바이오에어로졸은 실내 공간에서 심각한 건강 문제를 유발시키는 물질 중 하나로 관리의 대상이며, 효율적인 관리를 위해 바이오에어로졸을 정량적으로 측정하는 기술의 개발은 필수적이라 할 수 있다. 현재까지 주로 사용되는 바이오에어로졸 측정 기술은 포집 및 배양의 과정을 거치는 방법으로 24시간 이상의 시간을 필요로 하며 배양이 불가능한 균에 대한 정보는 얻을 수 없다는 단점이 있다. 또한 현재 바이오에어로졸에 대한 규제는 총 수 농도에 대한 것이며, 이는 실제로 인체에 유해한 병원성 바이오에어로졸을 관리하기에는 효율적이지 못하다는 점이 지적되고 있다.

실내 공간에서 바이오에어로졸을 측정하는 목적이 오염원을 파악하여 건강상의 문제를 유발할 수 있는 바이오에어로졸에 대한 효과적인 대책을 수립하는 것에 있음을 고려할 때, 인체에 유해한 병원성 바이오에어로졸을 짧은 시간 내에 검출할 수 있는 바이오에어로졸 측정 기술의 개발이 필수적이다.

- 참고문헌 -

1. Hinds, W. C., 1999, *Aerosol Technology*, 2nd, John Wiley & Sons, pp. 394-401.
2. 환경부, 2004, “다중이용시설등의실내공기질관리법시행규칙”
3. 환경부, 2004, “실내공기질공정시험방법”, pp. 155-159.
4. Terzieva, S., Donnelly, J., Ulevicius, V., Grinshpun, S. A., Willeke, K., Stelma, G. N. and Brenner K. P., 1996, "Comparison of Methods for Detection and Enumeration of Airborne Microorganisms Collected by Liquid Impingement", *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 62, pp. 2264-2272.
5. Molecular Probes, Inc., 2004, "Live/Dead BacLight™ Bacterial Viability Kits"
6. Wittmaack, K., Wehnes, H., Heinzmann, U. and Agerer, R., 2004, "An Overview on Bioaerosols Viewed by Scanning Electron Microscopy", *Science of the Total Environment*, Vol. 346, pp. 244-255.
7. Agranovski, V., Ristovski, Z., Hargreaves, M., Blackall, P. J. and Morawska, L., 2003, "Real-time Measurement of Bacterial Aerosols with the UVAPS: Performance Evaluation", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 34, pp. 301-317.