

와이어-평판 형태의 전기집진기식 바이오-에어로졸 포집기 성능 수치해석: 이온풍의 영향

최현식¹⁾ · 유기현¹⁾ · 황정호^{1)*}

¹⁾연세대학교 기계공학과

(투고 2023년 6월 23일, 수정 2023년 8월 6일, 게재확정 2023년 8월 7일)

Numerical Analysis on Wire-Plate Electrostatic Precipitator Performance for Bioaerosol Capture: Effect of Ionic Wind

Hyun Sik Choi¹⁾, Gihyeon Yu¹⁾, Jungho Hwang^{1)*}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

(Received June 23 2023; Revised August 6 2023; Accepted August 7 2023)

Abstract

In our previous study, a wire-plate type electrostatic precipitator (ESP) was developed to collect bioaerosols of 100 nm size. In the study, various flow rates (40 ~ 100 L/min) and applied voltages (3 ~ 10 kV) were tested for experiment. In this study, numerical analysis was performed for the ESP of the previous study with the same flow rates and applied voltages, but with varying the size of bioaerosols to 0.04 ~ 2.5 μm . Overall, the numerical analysis results well predicted the experimental data. Bioaerosols of 0.1 ~ 0.5 μm showed the minimum collection efficiency for all conditions because of low charge number. The effect of the ionic wind generated by the corona discharge was calculated. However, the ionic wind did not affect much the collection efficiency. The aerosol collection in the ESP of this study was due to the electrostatic force generated by particle charge in the electric field. This numerical study on the ESP can be used for the design and optimization of higher flow rate (> 100 L/min) ESP.

Keywords: CFD, Electrostatic precipitator (ESP), Collection efficiency, Bioaerosol, Particle motion

* Corresponding author.

Tel : +82-2-2123-2821

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

1. 서론

2019년 SARS-CoV-2 (COVID-19) 팬데믹은 전 세계적으로 큰 변화를 가져왔다. 특히 외부 활동 제한 등의 팬데믹 대응 정책으로 인해 사람들이 실내에 머무는 시간이 증가하였으며, 이에 따라 실내 공기 질에 대한 관심도가 크게 증가하였다(Wang et al., 2020). 전 세계적으로 약 2억 5천만 명이 공기 중 병원균을 통해 전염되는 질병으로 고통받고 있는 것으로 알려져 있다. 최근 발생한 SARS-CoV-2 (COVID-19)뿐 아니라, Middle East Acute Respiratory Syndrome (MERS), Influenza (H1N1), and Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS)의 위협으로 공중 보건에 대한 우려가 강화되어 왔다(Wang et al., 2020; Hilgenfeld and Peiris, 2013; Peccia et al., 2008; Cowling et al., 2013). 공기 중에 부유하는 생물학적 기원의 입자를 바이오에어로졸(Bioaerosol)이라고 하며, 박테리아, 곰팡이, 바이러스 및 화분 등이 이에 포함된다. 바이오에어로졸은 알레르기, 비염, 천식 및 만성 폐쇄성 폐질환과 같은 호흡기 질환을 일으키는 것으로 알려져 있다(Douwes et al., 2003).

선행 연구에 따르면, 바이오에어로졸에 의한 전파 및 감염률은 실외에서보다 실내에서 더 높은 것으로 조사되었으며(Klepeis et al., 2001; Moon and Ryu., 2021; Chen et al., 2021), 세계보건기구 (World Health Organization, WHO)는 실내 공기 오염원을 만성질환을 일으키는 5대 원인 중 하나로 지정하였다. 따라서, 공기 전파 감염을 효과적으로 차단하기 위해서는 실내 바이오에어로졸 농도를 실시간으로 측정할 수 있는 기술이 필요하며, 이를 위해서는 효과적으로 바이오에어로졸을 포집 할 수 있는 기술이 요구된다.

바이오에어로졸을 포집하는 기술로는 필터 포집 기술(Burton et al., 2007; Li et al., 2018), 습식 사이클론 기술(Cho et al., 2019; Cho et al., 2020; Heo et al., 2021), 전기집진기술등이 개발되어 왔으며, 장치의 편리성과 안정성, 높은 포집 효율을 이유로 전기집진기가 주로 사용되고 있다(Gao et al., 2020; Hong et al., 2021; Jeong, et al., 2023; Kim et al., 2021; Kettleson et al., 2009; Park et al.,

2016; Priyamvada et al., 2021). 전기집진기는 코로나 방전(corona discharge)을 이용해 유입되는 입자를 전기적으로 하전(charging) 시키는 방전부와 정전기력(electrostatic force)을 이용해 하전된 입자를 포집하는 집진부로 구성되어 있으며, 한 공간에서 입자의 하전과 집진이 동시에 일어나는 1단 전기집진기와 하전부, 집진부가 분리되어 있는 2단 전기집진기로 구분된다. 코로나 방전 발생을 위한 공간 내 불평등 전계(non-uniform electric field) 형성을 위해 주로 wire-plate, pin-plate, rod-plate 등의 구조가 사용되고 있으며(Gao et al., 2020; Kim et al., 2021; Kettleson et al., 2009; Park et al., 2016). 2단 집진기의 경우 plate-plate 형상의 집진부가 주로 사용되고 있다(Jeong et al., 2023; Priyamvada et al., 2021).

이온풍은 코로나 방전 시, 1단집진기 혹은 2단집진기-하전부의 pin이나 wire 주변에서 발생하는 유동 현상이다(Liang et al., 1994; Rickard et al., 2005; Go et al., 2008). 코로나 방전에 의해 발생한 가스 이온은 쿨롱력(Coulomb's force)에 의해 전계 방향으로 가속되며 주변의 중성 공기 분자와 충돌하게 되고, 가속된 이온과 중성 공기 분자의 운동량 교환에 의해 거시적인 공기 흐름이 발생된다. 전기집진기 전원의 극성(polarity)에 무관히, 코로나 방전에 의해 생성된 가스 이온은 고전압이 인가된 방전부에서 접지(ground)되어 있는 집진부로 운동하므로, 이온풍 또한 방전부에서 집진부방향으로 발달된다. 집진부 표면에서의 이온풍은 입자의 집진판 부착에 영향을 미칠 수 있으며, 전기집진을 이용한 효과적인 바이오에어로졸 포집을 위해서는 이온풍이 바이오에어로졸 포집에 미치는 영향 고려하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 Kim et al. (2021)의 바이오에어로졸 샘플러를 해석 대상으로 선정하고, 수치해석을 통해 이온풍이 바이오에어로졸에 미치는 영향을 살펴보았으며, 그 결과를 Kim et al. (2021)의 실험결과와 비교하였다. 또한 해석 대상 전기집진기에서 입자 크기에 따른 입자 하전 및 정전기력에 의한 입자 거동을 해석하였으며 이온풍이 포집효율에 미치는 영향을 분석하였다.

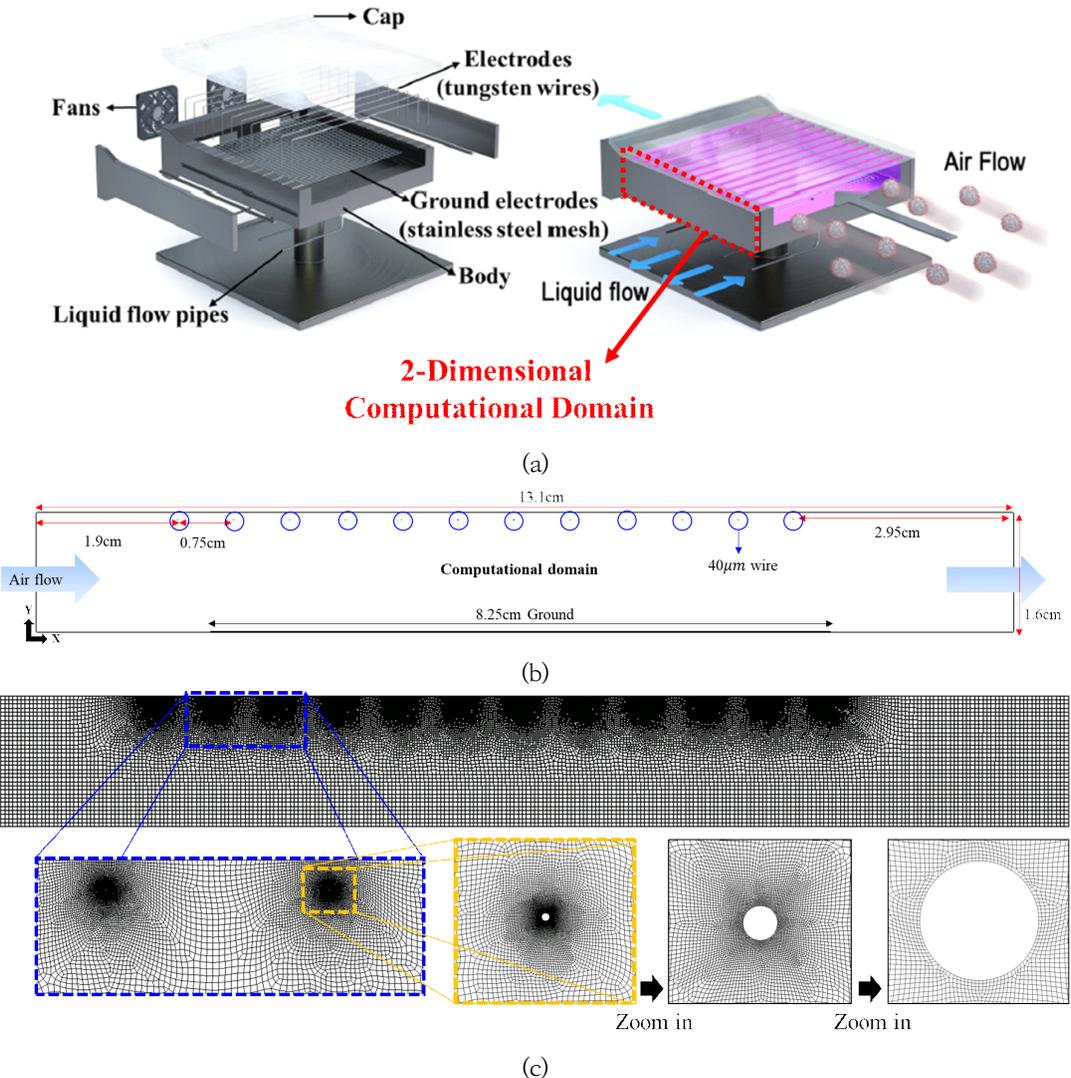


Figure 1. (a) The 3D geometry of the bioaerosol sampler, (b) Computational 2D domain of the sampler, (c) Meshes in the total domain

2. 연구방법

2.1 해석 대상

본 연구 해석 대상인 Kim et al. (2021)의 바이오에어로졸 샘플러(그림 1(a))는 상부에 설치된 10개의 와이어를 이용해 코로나 방전을 발생시켰으며, 와이어 하부에는 접지(ground)된 철판(plate) 위에 수막을 형성시켜

집진부로 사용하였다. 약 100 nm 크기의 HCoV-229E 바이러스 입자를 대상으로 실험을 수행했으며, 이때 바이오에어로졸 샘플러에 유입되는 공기의 유량은 40 ~ 100L/min 이었다. 실제 포집기에서는 접지(ground)된 철판 위에 물이 존재하기 때문에 다상 유동으로 해석하는 것이 원칙이다. 그러나 다상 유동에 대해서는 해석하기에 복잡하고 이에 대한 선행 연구가 전무한 현

실이다. 두 매질(공기와 물)의 경계면에서 만족해야하는 경계조건식은 아래와 같다(Griffiths and Colleger, 1999).

$$\vec{E}_{t,air} = \vec{E}_{t,water} \quad (1)$$

$$\hat{n}_{water} (\epsilon_{air} \vec{E}_{n,air} - \epsilon_{water} \vec{E}_{n,water}) = q_s \quad (2)$$

\vec{E}_{air} , \vec{E}_{water} 는 각각 공기와 물의 전기장이고(N/C), \hat{n}_{water} 는 물에서 공기로의 외부 단위 법선 벡터이며, ϵ_{air} 와 ϵ_{water} 는 각각 공기와 물의 유전율(F/m)이다. 첨자 t, n 은 각각 전기장의 접선성분과 법선성분이고, q_s 는 인터페이스에서의 표면 전하 밀도이다(C/m^2). 또한 $\epsilon_{air} \approx \epsilon_0$, $\epsilon_{water} = 80\epsilon_0$ 의 관계식을 갖는다. Zehtabiyani-Rezaie et al. (2018)에 의하면, 물은 전도성 물질이므로 q_s 를 무시한다고 간주하면, \vec{E}_{water} 는 \vec{E}_{air} 보다 80배 작다. 따라서 물을 통한 전기장 또는 전기 포텐셜 강도가 공기보다 작기 때문에, 접지된 plate와 수막표면이 대략 동전위를 유지한다고 가정하는 것은 타당하다. 따라서 수표면을 ground로 설정하였고 수표면과 와이어 사이의 공기 공간에 대하여 해석을 수행하였다. 해석은 2D로 진행하였으며, 해석 도메인은 포집기를 측면에서 보았을 때, 그림 1(a)에 표시된 구역이다. 해석 도메인의 자세한 그림은 그림 1(b)에 나와 있고, 크기는 세로 1.6cm × 가로 13.1cm 였다. 와이어의 직경은 40 μ m이며 와이어 사이의 간격은 0.75cm, 와이어의 처음과 끝은 도메인의 양 끝에서 각각 1.9cm, 2.95cm 떨어져 있었다. Ground의 길이는 8.25cm 였다. 그림 1(c)에서 보여주듯이, 와이어부근에서의 조밀한 격자생성을 위해, 한 개의 와이어에 주변으로 총 100개의 격자가 생성되도록 하였다. 총 격자의 수는 10 만개 이었다.

2.2 해석 방법

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 ANSYS사의 FLUENT를 사용하였고, Transient 상태로 해석을 진행하였으며, 공기 유동의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} + q \vec{E} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)는 각각 질량 보존의 법칙과 운동량 보존의 법칙을 계산하기 위한 연속 방정식과 운동량 방정식이다. 여기서 ρ 는 유체 밀도(kg/m^3), \vec{V} 는 유체 속도 벡터(m/s), μ 는 유체 점성 계수($Pa \cdot s$), p 는 유체 압력(N/m^2), \vec{g} 는 중력가속도(m/s^2), q 는 이온 전하 밀도(charge density, C/m^3) 그리고 \vec{E} 는 전기장 벡터(N/C)이다. 이온풍의 영향을 고려하기 위해, 분자간의 충돌을 완전탄성충돌로 가정하고, 이온풍을 발생시키는 힘인 $q \vec{E}$ 를 운동량 방정식에 포함시켰다(Kim et al., 2020). 본 연구에서 난류 모델은 Standard k- ϵ model을 사용하였으며, 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k \vec{V}) = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + P_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon \vec{V}) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5), (6)는 난류 운동에너지 (k) 방정식과 난류 운동에너지 소산율 (ϵ) 방정식이다. P_k 는 평균 속도 기울기로 인한 난류 운동에너지 생성항이고, ϵ 는 난류 에너지 소산율이며, $C_{1\epsilon}$ 와 $C_{2\epsilon}$ 는 각각 1.44와 1.92 값을 각각 가지는 상수항이다.

유동장 내 입자의 거동을 해석하기 위해, Lagrangian method를 사용하였다. 미세먼지 확산과 분포 예측에서는 Lagrangian method가 더 정확할 수 있다는 기존 결과를 바탕으로 DPM (Discrete Phase Model)을 사용하였으며, 지배방정식은 다음과 같다.

$$m \frac{d\vec{V}_p}{dt} = m \frac{(\vec{V} - \vec{V}_p)}{\tau_r} + m \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\tau_r} + q_p \vec{E} \quad (7)$$

$$\tau_r = \frac{d_p^2 \rho_p C_C}{18\mu} \quad (8)$$

$q_p(C)$ 는 입자의 하전량으로, 입자의 총 하전수 (n_p)와 기본전하량 ($e = 1.6 \times 10^{-19} C$)의 곱(= $n_p e$)이다. τ_r 는 입자의 완화시간 (relaxation time), \vec{V}_p , m , d_p , ρ_p 는 각각 입자의 속도 벡터, 질량, 직경, 밀도이다. C_C 는 미끄럼 보정계수 (cunningham correction coefficient)이고, 아래의 식으로 규정할 수 있다.

$$C_C = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[2.34 + 1.05 \exp\left(-0.39 \frac{d_p}{\lambda}\right) \right] \quad (9)$$

λ 는 공기의 평균 자유 행정 (mean free path)이고 1 atm, 293K 일 때, 0.066 μ m를 가진다(Hinds and Zhu, 2022). 전기집진기 내부의 입자는 코로나 방전에 의해 생성된 공기 이온으로 하전 된다. 입자의 하전 방식은 크게 2가지로, 전자와 입자의 무질서한 충돌로 하전이 되는 확산하전(diffusion charging)과 강한 전기장에서 전자에 의해 하전 되는 전계하전(field charging)으로 분류할 수 있고(Reist, 1993), 2가지 방식의 합으로 입자의 총 하전수를 도출할 수 있다(Ahmad et al., 2018; Liu et al., 1978; Choi and Hwang, 2021).

$$n_p = n_d + n_f \quad (10)$$

$$n_d = \frac{d_p k_B T}{2K_E e^2} \cdot \ln \left[1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_{ion} e^2 N_{ion} t}{2k_B T} \right] \quad (11)$$

$$n_f = \left(\frac{3\epsilon}{3+2} \right) \cdot \left(\frac{E d_p^2}{4K_E e} \right) \cdot \left(\frac{\pi K_E e Z_{ion} N_{ion} t}{1 + \pi K_E e Z_{ion} N_{ion} t} \right) \quad (12)$$

n_p 는 입자의 총 하전수 이고, n_d 와 n_f 는 각각 확산하전에 의한 하전수, 전계하전에 의한 하전수 이다. k_B 는 볼츠만 상수이고, K_E 는 전기비례상수로서 $1/4\pi\epsilon_0$ 이다. ϵ_0 는 진공유전율 (permittivity of vaccum), \bar{c}_{ion} 는 이온평균속도 (2.4×10^2 m/s), ϵ 는 비유전율 (relative permittivity), T는 온도이다. N_{ion} 은 이온 농도로 아래의 식으로 구할 수 있다(Biskos et al., 2005).

$$N_{ion} = \frac{I_c}{e Z_{ion} EA} \quad (13)$$

IC(A)는 코로나 전류, Z_{ion} 은 이온의 전기이동도 (ion mobility)로 대략 1.5 cm²/V·s 값을 갖는다. A(m²)는 하전부의 접지 면적이다.

전기 포텐셜 ((V), N·m/C) 와 전류밀도 ((\vec{j}), A/m²) 그리고 이온 전하 밀도 (($q=N_{ion}e$), C/m³)의 분포는 아래 식에 의해 결정된다.

$$\nabla^2 V = -\frac{q}{\epsilon_0} \quad (14)$$

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (15)$$

$$\vec{j} = (\vec{V} + Z\vec{E})q \approx Z\vec{E}q \quad (16)$$

식 (14)와 식 (15)은 각각 푸아송 방정식 (poisson equation)과 전하량 보존 방정식 (charge conservation equation)이다. 공기 속도 (\vec{V})에 비해 이온 속도 ($Z\vec{E}$)가 매우 크기 때문에 본 연구에서는 공기 속도를 생략하였다. \vec{j} 를 얻으면 ground 면적에 대해 식 (16)를 적분하여 전류를 계산할 수 있다. 식 (14-16)에서 도출한 q 를 식 (4)와 결합하여, 운동량 방정식을 계산하였다.

2.3 해석 경계 조건

Table 1. Boundary conditions

Variable	Inlet	Outlet	Discharge electrode	Collecting plate
Flow velocity	$\vec{V} = \vec{V}_{inlet}$	-	$\vec{V} = 0$	$\vec{V} = 0$
Particle velocity	$\vec{V}_p = 0$	$\frac{\partial \vec{V}_p}{\partial n} = 0$	$\vec{V}_p = 0$	$\vec{V}_p = 0$
Voltage	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	$V = V_0$	$V = 0$
Charge density	$\frac{\partial q}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial q}{\partial n} = 0$	$q = q_0$	$\frac{\partial q}{\partial n} = 0$

V_0 , applied voltage; q_0 , space charge density in the ionization region; n , normal direction.

유속과 전기집진기 인가전압을 Kim et al. (2021)의 값들과 동일하게 설정하였다. Kim et al. (2021)의 실험에서 총 4가지 유량을 사용하였고, 각각 100L/min, 80L/min, 60L/min, 40L/min이다. 유량을 면적으로 나눠 유속을 도출하였고, Inlet-유속(\vec{V}_{inlet})은 각각 1.3m/s, 1.04m/s, 0.78m/s, 0.52m/s이다. 유동과 입자의 outlet은 pressure-outlet으로 설정하였다. 인가전압(V_0)은 실험과 같은 수치인 4, 6, 8, 10 kV 조건에서 해석을 수행하였다. DPM을 사용하여, 6가지의 서로 다른 크기를 가지는 입자를 발생 시켰으며, 그 크기는 각각 0.04 μ m, 0.1 μ m, 0.3 μ m, 0.5 μ m, 1 μ m, 2.5 μ m이다. Inlet과 Outlet의 벽 조건은 escape로 설정하였고, 그 외의 벽은 trap으로 설정하였다. 자체

한 경계 조건은 표 1에 나타났다. 방전극의 이온 전하 밀도 경계 조건으로는 FLUENT를 통해 계산한 전류밀도(\vec{j})를 ground 면적에 적분하여 전류값(IC)을 도출하였다. 도출한 전류값을 실제 실험 I-V 커브의 값과 일치하는 이온 전하 밀도(q_i)를 찾아내어 경계 조건 값으로 설정하였다. 그렇게 설정된 값은 4 kV의 경우 $3 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$, 6 kV의 경우 $4 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$, 8 kV의 경우 $4.5 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$, 10 kV의 경우 $5 \times 10^{-5} \text{ C/m}^3$ 이다. 수렴 조건은 residual을 10^{-4} 이하로 설정하였다.

3. 결과 및 토의

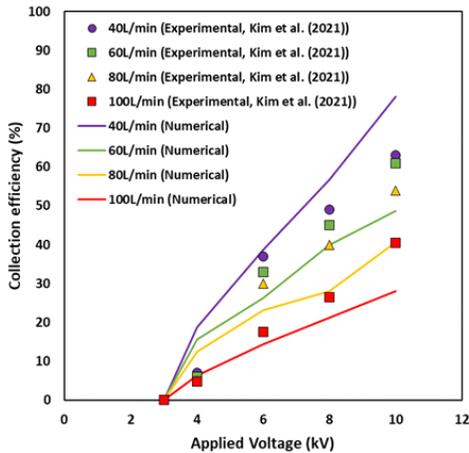


Figure 2. Collection efficiencies of particles ($d_p = 100\text{nm}$) at various applied voltages and various air flow rates

그림 2는 유량과 인가전압에 따른 집진효율을 실험 결과와 계산 결과를 비교한 그래프이다. 실선은 수치해석 계산 결과이고, 점들은 Kim et al. (2021)의 실험 결과 값이다. 100nm크기의 입자를 200개 발생시켜서 얻은 효율로, 유량을 색깔별로 분류하였고, 보라색, 초록색, 노란색, 빨간색은 각각 유량이 40L/min, 60L/min, 80L/min, 100L/min이다. 전체적으로 인가전압이 증가하면 집진효율 (collection efficiency)가 증가하였고, 전체 유량이 증가할수록 집진효율은 감소하였다. 이러한 결과는 Deutsch-Anderson 방정

식(Hinds and Zhu, 2022)을 통해 입증될 수 있고, 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2Z_p EL}{VS}\right) \tag{17}$$

L은 포집기의 가로 길이(13.1cm), S는 포집기의 세로 길이(1.6cm), Z_p 는 입자의 전기이동도($m^2/V \cdot s$)로 아래 식으로 표현된다.

$$Z_p = \frac{n_p e C_C}{3\pi\mu d_p} \tag{18}$$

유속이 증가하면, 체류시간이 감소하게 돼서 하전수가 감소하게 된다. 하전수의 감소는 전기이동도 및 전기이동속도가 감소하면서 집진효율이 낮아 지게 된다. 실험 값과 계산값의 집진효율 오차를 계산해보면 10kV의 전압을 인가 하고, 유량이 40L/min 일 때, 15.1%의 차이를 보였으나 대부분 10% 미만의 집진효율 차이를 보이며 대체로 일치하는 것을 확인하였다.

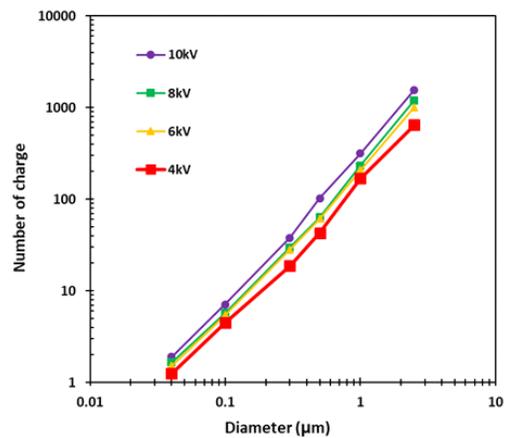


Figure 3. Number of charges of particles at various applied voltages

그림 3은 시뮬레이션을 통해 도출한 입자직경 및 인가전압별 하전수 결과이다. 크기가 0.04μm, 0.1μm, 0.3μm, 0.5μm, 1μm, 2.5μm인 입자들의 하전수는 각각 1.9, 7.1, 37, 102, 315, 1550였고, 4kV를 인가한 경우, 하전수는 각각 1.2, 4.4, 18, 42, 168, 645였다. 입자크기가 증가 할수록 하전수는 지수승으로 증

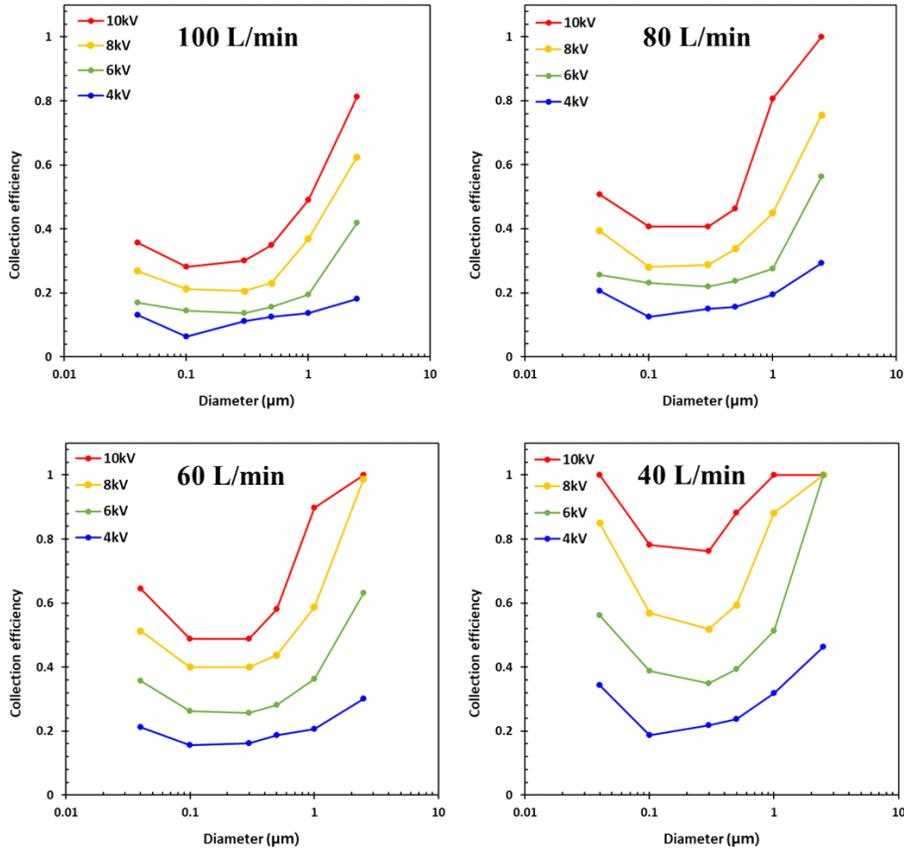


Figure 4. Effects of particle size on collection efficiency for various applied voltage and flow rates.

가하는 것을 확인 하였다. 또한 인가전압이 증가함에 따라 하전수 역시 증가하는 것을 확인하였다.

그림 4는 유량과 인가전압뿐만 아니라 입자 크기별 집진효율을 나타낸 계산 결과 그래프이다. 유량이 100L/min 일때, 10kV의 전압을 인가 한 경우, 2.5μm 크기를 가지는 입자의 집진효율은 81%로 다른 전압 조건에 비해 높았으며, 8kV, 6kV, 4kV의 전압을 인가 한 경우, 집진효율은 각각 62%, 41%, 18%이었다. 0.3 μm 크기의 입자의 경우 인가전압에 따른 포집 효율은 각각 30%, 20%, 13.7%, 11%로, 인가전압이 낮아질수록 포집 효율 또한 감소하였고, 직경이 0.04μm인 입자 역시 35%, 26%, 16%, 13%로 감소하였다. 속도에 따라, 직경이 2.5μm, 0.04μm인 입자의 효율을 비교 해보면, 속도가 증가 할수록 직경이 0.04μm인 입자의

효율이 2.5μm의 입경을 가진 입자보다 더 많이 감소한 것을 확인하였다. 이는 입자 크기에 따른 전기이동도의 차이 때문이다. 0.04μm 입자는 2.5μm인 입자에 비해 상대적으로 낮은 전기이동도를 가진다. 전기이동도가 낮은 입자는 식(17)에 의해서 속도가 증가할수록 집진효율의 감소가 더 크게 나타난다. 따라서 유속이 빠른 100L/min에서는 대체로 입자 크기가 커질수록 집진효율이 증가하였다. 80L/min의 경우, 2.5μm 크기의 (10kV) 입자는 100%의 집진효율을 보였고, 인가 전압조건이 6kV와 8kV에서도 직경이 1μm인 입자에 비해 집진효율의 증가 폭이 컸다. 직경이 0.04μm와 0.3μm의 입자의 경우, 집진효율 차이가 100L/min에서의 결과 보다 조금 더 증가하는 것을 확인하였다. 60L/min의 경우, 2.5μm 크기의 입자들은 인가전압이

8kV에서도 100% 집진효율을 보이는 것을 확인하였다. 또한 0.04 μm 과 0.3 μm 의 집진효율 차이가 증가하는 것을 확인하였다. 4kV에서는 모든 입자 크기에 대해서 효율이 크게 증가하지 않았다. 40L/min의 경우, 2.5 μm 크기의 입자가 6kV일때도 100% 집진효율을 가지는 것을 확인하였고, 0.04 μm 크기의 입자도 10kV를 인가하였을 때, 100% 집진효율을 나타내었다. 유속이 감소할수록 U자 모양의 집진기 효율 곡선을 보였고, 0.3 μm 크기의 입자가 제일 작은 효율을 가지는 것을 확인하였다. 결과적으로 속도가 줄어들면서 크기가 작은 수십 나노대 영역의 입자들의 집진효율이 증가하는 것을 확인하였다.

일반적으로 전기집진기에서 0.2 ~ 0.5 μm 크기의 입자의 집진효율이 가장 낮게 나타나고, 이보다 크거나 작은 입자에 대해서는 집진 효율이 증가하여, 입자 크기에 따른 집진 효율의 그래프는 U자 형태를 띤다. 이는 0.2 ~ 0.5 μm 크기의 입자는 다른 입자에 비해서 낮은 전기이동도를 가지기 때문이다.(Hinds and Zhu, 2022; Jaworek et al., 2018; Adamiak, 2013).

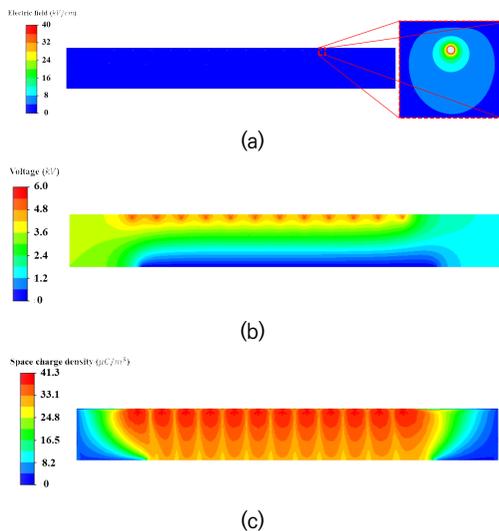


Figure 5. Contours of (a) electric field, (b) voltage, and (c) space charge density.

6kV의 전압을 인가하여 전기장의 세기를 계산한 결과, 그림 5(a)와 같이 위치에 따른 전기장의 세기를 얻었다. 전기장의 세기는 와이어 주변에서 강하게 작용하

는 것을 확인하였고, 대부분의 유동 공간에서는 상대적으로 낮은 전기장의 세기를 가졌다. 그림 5(b)는 전기 포텐셜을 계산한 그림이고, 와이어와 접지의 비스듬한 배치로 인하여 전기 포텐셜 역시 비스듬하게 기울어져 형성되었다. 그림 5(c)는 이온 전하 밀도를 나타낸 그림으로, 와이어 주변에서 가장 많은 이온이 밀집한 것을 확인할 수 있었고, 접지 방향으로 이온 전하 밀도가 퍼져있는 것을 확인할 수 있었다.

그림 6(a)는 식(4)에서 $q\vec{E}$ 항을 고려한 속도분포이다. 와이어-평판 포집기의 이온풍 효과를 알아보기 위하여, $q\vec{E}$ 항을 고려하지 않은 속도 분포 (그림 6(b)) 역시 도출하였다. 그림에서 보여주듯이 이온풍에 따른 속도장 변화는 전혀 나타나지 않았다. 핀-평판 방식의 전기집진기의 경우 강한 이온풍이 발생되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 핀에서의 이온 전하 밀도 초기 경계값이 대략 0.01 C/m³로 (Kim et al., 2020), 와이어-평판 방식 보다 대략 1000배 정도 높기 때문이다.

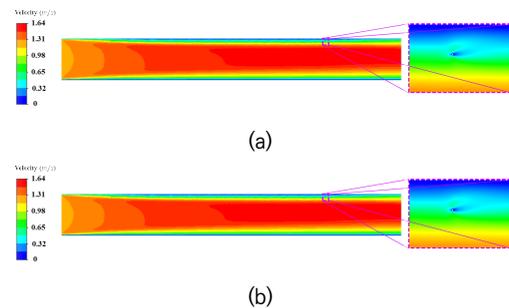


Figure 6. Comparison of flow (a) with and (b) without consideration of $q\vec{E}$ (force that generates ionic wind, see eq.2)

그림 7에서는 6kV의 전압을 인가하였을 때, 유량에 따른 1 μm 대표 입자 8개의 거동이다. 유량이 감소할수록 입자 집진효율은 19%, 27.5%, 36%, 51%로 증가하였다. 40L/min의 경우, 생성된 대표 입자 8개 중에 4개의 입자들 (#5- #8)이 쿨롱 힘으로 인하여 이동 방향이 다른 유량에 비해 상대적으로 아래로 더 꺾이는 것을 확인할 수 있었고, 그에 따라 집진판에 많이 포집되었다.

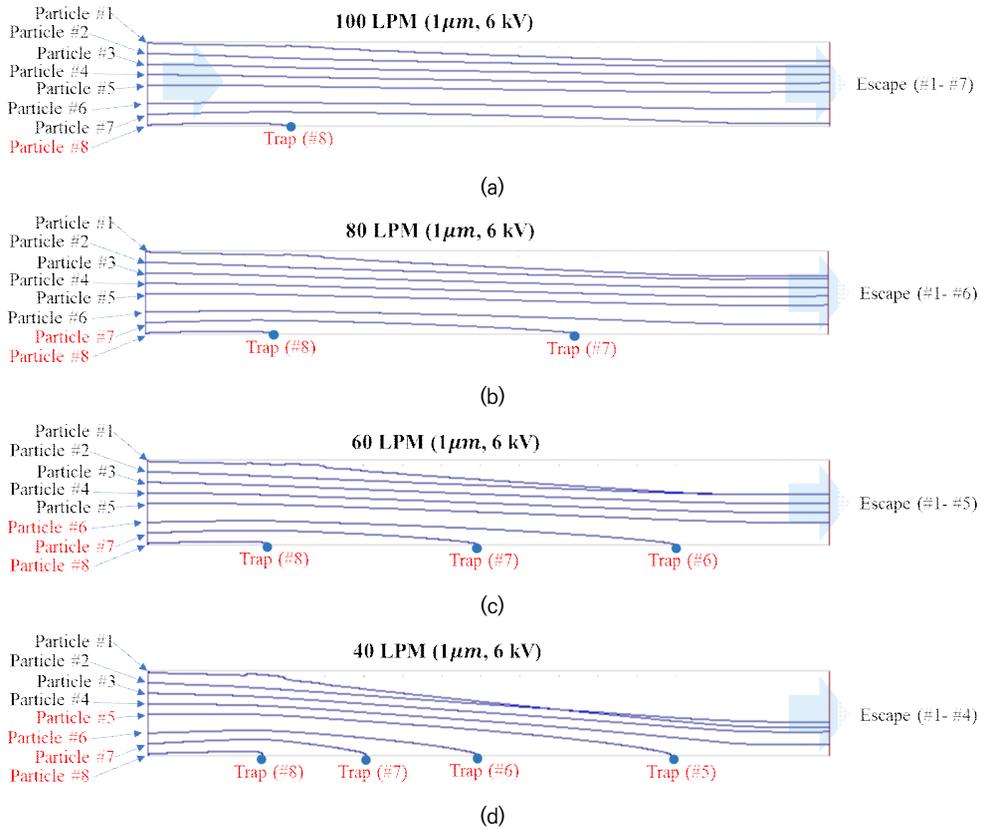


Figure 7. Trajectories of 1µm particles at various flowrates (a) 100L/min (b) 80L/min (c) 60L/min (d) 40L/min (applied voltage = 6 kV).

4. 결론

본 연구에서는 40~100L/min의 용량을 가지는 포집기에 대한 코로나 방전 해석과 유체의 이동과 더불어 입자의 거동에 대한 수치해석을 진행하였다. 본 연구에서는 보다 다양한 크기의 입자들에 대해서, 다양한 유량 안에서 (40~100L/min), 전기집진기의 에어로졸 집진 효율을 도출하였다. 모든 구간에서 실험값과의 최대 오차율은 15%로, 대부분 비슷한 경향을 보였다. 또한, 저유량 및 고 인가 전압 조건에서 모든 크기의 입자들의 집진 효율이 가장 높게 도출되는 것을 확인하였고, 입자의 하전과 집진을 위해서 전기집진장치에 설치한 와이어에서 코로나 방전을 통해서 생성되는 이온풍이 예상과는 달리 입자의 집진에 크게 영향을 미치지 않는

다는 것을 밝혔다. 전기집진기의 효율이 유속이 증가할수록 선명한 'U'모양의 집진효율을 그리는 것을 확인하였다. 본 연구 결과는 다양한 운전 조건에서 전기집진 장치의 최대 입자의 집진 효율을 확보하기 위한 장치의 설계에 사용될 수 있을 것이라 판단한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20181110200170)

References

- Adamiak, K. (2013). Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: A review. *Journal of Electrostatics*, 71(4), 673-680.
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.03.001>
- Ahmad, S. T., & Smail, J. M. (2018). The Optimum Operation Conditions for Electrostatic Precipitator (ESP) in Particulate Emitter Industries. In 2018 International Conference on Pure and Applied Science. <http://dx.doi.org/10.14500/icpas2018.nmt106>
- Biskos, G., Reavell, K., & Collings, N. (2005). Electrostatic characterisation of corona-wire aerosol chargers. *Journal of Electrostatics*, 63(1), 69-82.
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.07.001>
- Burton, N. C., Grinshpun, S. A., & Reponen, T. (2007). Physical collection efficiency of filter materials for bacteria and viruses. *The Annals of occupational hygiene*, 51(2), 143-151.
<https://doi.org/10.1093/annhyg/mel073>
- Chen, B., Jia, P., & Han, J. (2021). Role of indoor aerosols for COVID-19 viral transmission: a review. *Environmental chemistry letters*, 19, 1953-1970.
<https://doi.org/10.1007/s10311-020-01174-8>
- Cho, Y. S., Hong, S. C., Choi, J., & Jung, J. H. (2019). Development of an automated wet-cyclone system for rapid, continuous and enriched bioaerosol sampling and its application to real-time detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 284, 525-533.
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113499>
- Cho, Y. S., Kim, H. R., Ko, H. S., Jeong, S. B., Chan Kim, B., & Jung, J. H. (2020). Continuous surveillance of bioaerosols on-site using an automated bioaerosol-monitoring system. *ACS sensors*, 5(2), 395-403.
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssens.9b02001>
- Choi, H. S., & Hwang, J. (2021). Reduction of submicron-sized aerosols emission in electrostatic precipitation by electrical attraction with micron-sized aerosols. *Powder Technology*, 377, 882-889.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.09.031>
- Cowling, B. J., Ip, D. K., Fang, V. J., Suntarattiwong, P., Olsen, S. J., Levy, J., ... & Mark Simmerman, J. (2013). Aerosol transmission is an important mode of influenza A virus spread. *Nature communications*, 4(1), 1-6. DOI:10.1038/ncomms2922 | www.nature.com/naturecommunications
- Douwes, J., Thorne, P., Pearce, N., & Heederik, D. (2003). Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects. *Annals of Occupational Hygiene*, 47(3), 187-200.
<https://doi.org/10.1093/annhyg/meg032>
- Gao, W., Wang, Y., Zhang, H., Guo, B., Zheng, C., Guo, J., ... & Yu, A. (2020). A numerical investigation of the effect of dust layer on particle migration in an electrostatic precipitator. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(1), 166-179.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.11.0609>
- Go, D. B., Maturana, R. A., Fisher, T. S., & Garimella, S. V. (2008). Enhancement of external forced convection by ionic wind. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(25-26), 6047-6053.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransf>

- er.2008.05.012
- Griffiths, D. J., & Colleger, R. (1999). *Introduction to Electrodynamics* Prentice Hall Upper Saddle River. New Jersey, 7458.
- Heo, K. J., Ko, H. S., Jeong, S. B., Kim, S. B., & Jung, J. H. (2021). Enriched aerosol-to-hydrosol transfer for rapid and continuous monitoring of bioaerosols. *Nano Letters*, 21(2), 1017-1024.
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c04096>
- Hilgenfeld, R., & Peiris, M. (2013). From SARS to MERS: 10 years of research on highly pathogenic human coronaviruses. *Antiviral research*, 100(1), 286-295.
<https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2013.08.015>
- Hinds, W. C., & Zhu, Y. (2022). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons.
- Hong, S., Kim, M. W., & Jang, J. (2021). Physical collection and viability of airborne bacteria collected under electrostatic field with different sampling media and protocols towards rapid detection. *Scientific Reports*, 11(1), 14598.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-94033-7>
- Jaworek, A., Marchewicz, A., Sobczyk, A. T., Krupa, A., & Czech, T. (2018). Two-stage electrostatic precipitators for the reduction of PM_{2.5} particle emission. *Progress in Energy and Combustion Science*, 67, 206-233.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.03.003>
- Jeong, S. B., Shin, J. H., Kim, S. W., Seo, S. C., & Jung, J. H. (2023). Performance evaluation of an electrostatic precipitator with a copper plate using an aerosolized SARS-CoV-2 surrogate (bacteriophage phi 6). *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103124.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103124>
- Kettleson, E. M., Ramaswami, B., Hogan Jr, C. J., Lee, M. H., Statyukha, G. A., Biswas, P., & Angenent, L. T. (2009). Airborne virus capture and inactivation by an electrostatic particle collector. *Environmental Science & Technology*, 43(15), 5940-5946.
<https://doi.org/10.1021/es803289w>
- Kim, H. R., An, S., & Hwang, J. (2021). High air flow-rate electrostatic sampler for the rapid monitoring of airborne coronavirus and influenza viruses. *Journal of Hazardous Materials*, 412, 125219.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.12.5219>
- Kim, S., Tae, U. Y., & Hwang, J. (2020). Numerical investigation of the separation mechanism in an electrostatic aerosol-to-hydrosol separator by glow corona discharge: a quantitative comparison of the effects of ionic wind and Coulomb force. *Plasma Sources Science and Technology*, 29(7), 075008.
 DOI 10.1088/1361-6595/ab993b
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., ... & Engelmann, W. H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 11(3), 231-252.
 DOI: 10.1038/sj.jea.7500165
- Li, J., Leavey, A., Wang, Y., O'Neil, C., Wallace, M. A., Burnham, C. A. D., ... & Biswas, P. (2018). Comparing the performance of 3

- bioaerosol samplers for influenza virus. *Journal of aerosol science*, 115, 133-145. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.08.007>
- Liang, W. J., & Lin, T. H. (1994). The characteristics of ionic wind and its effect on electrostatic precipitators. *Aerosol Science and Technology*, 20(4), 330-344. <https://doi.org/10.1080/02786829408959689>
- Liu, B. Y. H., & Kapadia, A. (1978). Combined field and diffusion charging of aerosol particles in the continuum regime. *Journal of Aerosol Science*, 9(3), 227-242. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(78\)90045-9](https://doi.org/10.1016/0021-8502(78)90045-9)
- Moon, J., & Ryu, B. H. (2021). Transmission risks of respiratory infectious diseases in various confined spaces: A meta-analysis for future pandemics. *Environmental Research*, 202, 111679. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111679>
- Park, J. W., Kim, H. R., & Hwang, J. (2016). Continuous and real-time bioaerosol monitoring by combined aerosol-to-hydrosol sampling and ATP bioluminescence assay. *Analytica Chimica Acta*, 941, 101-107. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.08.039>
- Peccia, J., Milton, D. K., Reponen, T., & Hill, A. J. (2008). A role for environmental engineering and science in preventing bioaerosol-related disease. *Environmental Science & Technology*, 42(13), 4631-4637. <https://doi.org/10.1021/es087179e>
- Priyamvada, H., Kumaragama, K., Chrzan, A., Athukorala, C., Sur, S., & Dhaniyala, S. (2021). Design and evaluation of a new electrostatic precipitation-based portable low-cost sampler for bioaerosol monitoring. *Aerosol Science and Technology*, 55(1), 24-36. <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1812503>
- Reist, P. C. (1993). *Aerosol science and technology*, 2nd Edition. McGraw-Hill, Singapore.
- Rickard, M., Dunn-Rankin, D., Weinberg, F., & Carleton, F. (2005). Characterization of ionic wind velocity. *Journal of Electrostatics*, 63(6-10), 711-716. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2005.03.033>
- Wang, C., Horby, P. W., Hayden, F. G., & Gao, G. F. (2020). A novel coronavirus outbreak of global health concern. *The lancet*, 395(10223), 470-473. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30185-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30185-9)
- Zehtabiyani-Rezaie, N., Saffar-Avval, M., & Adamiak, K. (2018). Numerical investigation of water surface deformation due to corona discharge. *Journal of Electrostatics*, 96, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.015>