

공기 중 박테리아 포집을 위한 습식 사이클론의 CFD 해석을 이용한 설계 및 성능 평가

고현식 · 박정우 · 정지우 · 황정호*

연세대학교 기계공학과

(투고 2023년 6월 23일, 수정 2023년 8월 21일, 게재확정 2023년 8월 21일)

Design and Performance Evaluation using Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of Wetcyclones for the Collection of Airborne Bacteria

Hyun Sik Ko, Jungwoo Park, Jiwoo Jung, Jungho Hwang*

Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea

(Received June 23 2023; Revised August 21 2023; Accepted August 21 2023)

Abstract

We present the development of a wetcyclone sampler designed for the sampling of airborne bacteria. The wetcyclone design involves a combination of two traditional cyclone shapes and computational fluid dynamics (CFD) analysis to validate its effectiveness in terms of pressure drop and collection efficiency. The wetcyclone exhibits a collection efficiency of over 90% for bacteria, specifically targeting *Staphylococcus aureus*. Additionally, the wetcyclone enables continuous bioaerosol sampling using a liquid medium (deionized water), demonstrating a concentration ratio exceeding $>10^5$ and a stable microbial recovery rate of 81.9%. The application of real-time quantitative polymerase chain reaction (qPCR) and the colony counting method ensures precise measurement of the concentration ratio and microbial recovery rate.

Keywords: Bioaerosol, Wetcyclone, Collection efficiency, Aerosol-to-hydrosol sampler, Microbial recovery rate

1. 서론

공기 중 부유하는 입자 중 생물학적 기원을 가진 입자는 바이오에어로졸 (바이러스, 박테리아, 곰팡이, 꽃가

루 등)이라 일컬어지며 실내 공기 오염의 주요 원인 중 하나이다 (Burger, 1990; Douwes et al., 2003). 사람이 바이오에어로졸에 직접 노출되거나 흡입할 경우, 독소를 포함하고 있어 전염병, 알레르기, 천식과 같은 질병을 유발한다 (Bush and Portnoy, 2001; Lee and Liao, 2014). 다양한 나라와 기관에서는 공기 중의 생물학적 입자로부터 인간과 환경을 보호하기 위해

* Corresponding author.

Tel : +82-2-2123-2821

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

상당한 노력을 기울였으며, 실내 공기 질 관리 기준을 수립하고 있다. 특히, 세계보건기구에서는 실내 공기 중 곰팡이 농도를 공기 1 m³ 당 500 CFU (Colony forming unit) 미만으로 권고하고 있으며, 대한민국 환경부에서는 실내 공기 중 박테리아 농도를 공기 1 m³ 당 800 CFU 미만으로 권고하고 있다. (Rao et al., 1996, KME 2018).

일반적으로 박테리아를 검출하기 위해 사용하는 방법은 배양하여 CFU를 계수하는 방법과 PCR (polymerase chain reaction; 종합효소연쇄반응), ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay; 효소면역측정법), ATP (adenosine triphosphate) 측정과 같은 생화학적 방법이 있다. 이러한 방법 기반으로 만들어진 바이오센서는 각각의 검출 한계 (LOD; Limit of Detection)를 가지고 있으며, 일례로 PCR의 경우 LOD는 액체 1 mL 당 ~10² genome copy (GC) 이상의 박테리아 농도가 필요하다 (Corman et al., 2020). GC는 특정 DNA 또는 RNA 분자의 양을 의미하며, CFU는 미생물의 군집체를 의미한다. 다양한 연구 결과들로 GC/CFU 비율이 ~10배 정도인 것을 확인하였다 (Dabrazhynetskaya et al., 2011; Kairova and Rakhimzhanova, 2021; Weber et al., 2021). 따라서, PCR의 LOD를 충족시키기 위해서는 ~10 CFU/mL 이상의 농도로 농축할 수 있는 공기 중 박테리아 포집기가 필요하다.

공기 중 박테리아를 소량의 액체로 농축하여 포집하기 위한 상용 장비들은 많이 개발되어 있다 (BioSampler (SKC Inc.), BioGuardian Air Sampler (InnovaTek Inc.), BioCapture 650 (MesoSystems Technology Inc.)). 상용 장비들은 공기 중 입자를 액체에 농축 포집시키는데 이를 aerosol-to-hydrosol (ATH) 포집이라고 한다. ATH 포집은 상대적으로 부피가 큰 공기에서 소량의 액체로 입자가 포집되면서 입자의 농도가 증가된다. ATH 농축비는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$ATH = \frac{Q_{\text{sampling}} \times \eta}{V} \quad (1)$$

여기서, Q_{sampling} 은 공기 포집 유량, η 은 포집기의 효율, 그리고 V 은 포집 액체 부피 또는 포집 액체 유량이다. 상용 공기 포집기의 농축비는 단일 박테리아 크기

(0.8 μm)에 대하여 약 $5.9 \times 10^2 \sim 4.3 \times 10^4 \text{ min}^{-1}$ 이며, 특히, BioSampler는 농축비가 625 min^{-1} 이다 (Kim et al., 2020). 실내 공기 중 박테리아 농도가 $\sim 10^2 \text{ CFU/m}^3$ (10^{-4} CFU/mL , Jeong et al., 2022; Oh et al., 2023)이기 때문에, 박테리아 포집 효율이 100%라면 (Lin et al., 2000). 포집액 1 mL당 $6.25 \times 10^{-2} \text{ CFU/min}$ 가 포집된다. 그렇기에, PCR 검출을 위한 최소 농도인 10 CFU/mL를 충족하기 위해 약 2.6 시간을 포집하여야 한다. 따라서 포집 시간을 줄이기 위해서는 더 높은 농축비가 필요하다.

ATH 농축비를 증가시키기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. Hong et al. (2016)은 전기 집진기를 통해 공기 중 PSL (Polystyrene latex, 1 μm) 입자를 12.5 L/min의 공기 유량으로 0.5 mL의 액체에 포집하여 농축비를 7500 min^{-1} 로 높였다. 이때 입자 포집 효율은 30%이었다. Tan et al. (2011)은 전기 집진기 6.2 L/min의 공기 유량으로 400 μL 의 액체에 박테리아 (*Escherichia coli*)를 포집하여 농축비를 9300 min^{-1} 로 높였다. 이때 입자 포집 효율은 40 ~ 60%이었다. Sung et al. (2018)은 습식 사이클론을 개발하였으며, 500 L/min의 공기 유량으로 1.5 mL의 액체에 PSL (0.8 μm) 입자를 포집하였으며, 농축비를 66666로 높였다. 이때 입자 포집 효율은 20%이었다. Heo et al. (2021)은 습식 사이클론을 개발하였으며, 16 L/min의 공기 유량으로 40 $\mu\text{L/min}$ 의 액체에 공기 중 박테리아 입자를 포집하였다. 농축비는 2.4×10^6 이며, 절단 직경은 0.3 μm 이다.

본 연구에서는 높은 농축비 (>10⁵)와 높은 포집 효율 (>90%), 그리고 안정적인 미생물 회수율 (>80%)로 공기 중 박테리아를 포집하기 위한 습식 사이클론을 개발하였다. 습식 사이클론은 사이클론의 내부에 액막을 형성함으로써 입자 원심력의 효과를 증대하여 사이클론 내벽의 액막에 입자를 포집한다. 따라서, 포집 효율을 증가시키고 유입되는 공기와 액체의 부피 차이를 키울 수 있어 ATH 농축 성능이 높아진다. 사이클론 설계의 타당성을 입증하기 위하여 수치해석을 통해 차압 (pressure drop)과 포집 효율을 해석하였다. 또, 공기 중 입자 발생 실험을 통해 습식 사이클론의 포집 효율과 미생물 회수율을 확인하였다. ATH 농축 성능과 박테리아

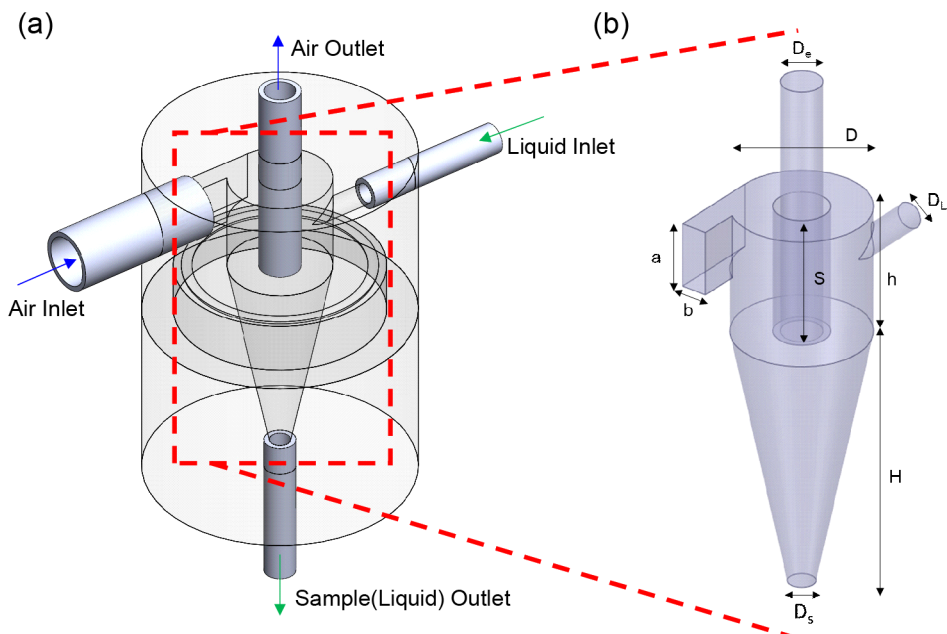


Figure 1. Geometry of wetcyclone (a) 3D CAD full image (b) Volume extraction image of wetcyclone

생존율은 PCR과 배양법을 통해 검증하였다. 모든 과정은 상용 공기 포집기인 BioSampler와 비교 검증하였다.

2. 사이클론 설계 및 수치해석 방법

2.1 사이클론 형상 설계

사이클론의 내부 유동의 유선 및 포집 효율을 해석하기 위해 수치적 방법을 사용하였다. 그림 1은 수치해석을 위해 사용된 3D CAD 및 습식 사이클론의 내부 형상을 보여준다. 사이클론 설계에 적용된 각 파라미터들 (D , a , b , ..., 표1)은 Shepherd & Lapple (1940)과 Stairmand (1951)을 참고했다. Shepherd & Lapple (1940)의 사이클론은 전체 길이 중 ($h + H$, 그림 2 (a)) 실린더 (Cylinder)의 길이 (h)를 늘려서 ($h = H$) 볼텍스 (vortex) 회전수를 높일 수 있는 형상을 채용하였다. 반면 Stairmand는 사이클론 콘 (cone)의 길이를 늘리고 ($h < H$, 그림 2 (b)), 공기 유입구 폭 (b)를 줄임으로써 공기 유속을 증가시키는 형상을 채용했다.

따라서, Shepherd & Lapple의 사이클론 형상은 차압이 낮은 사이클론 제작 목적에 적합하며, Stairmand의 사이클론은 높은 포집 효율의 사이클론 제작 목적에 적합하다 할 수 있다 (Sgrott et al, 2015). 그림 2 (c)는 Shepherd & Lapple과 Stairmand의 사이클론 형상과 실린더 직경에 따른 설계 수식을 보여준다.

Table 1. Geometrical dimensions for wetcyclone

	Our study
Cylinder diameter (D)	-
Height of inlet (a)	$0.5 \times D$
Width of inlet (b)	$0.2 \times D$
Diameter of gas outlet (D_e)	$0.3 \times D$
Length of vortex finder (S)	$1 \times D$
Length of cone (H)	$2 \times D$
Length of cylinder (h)	$1 \times D$
Diameter of sample outlet (D_s)	$0.2 \times D$
Diameter of liquid inlet (D_L)	$0.2 \times D$

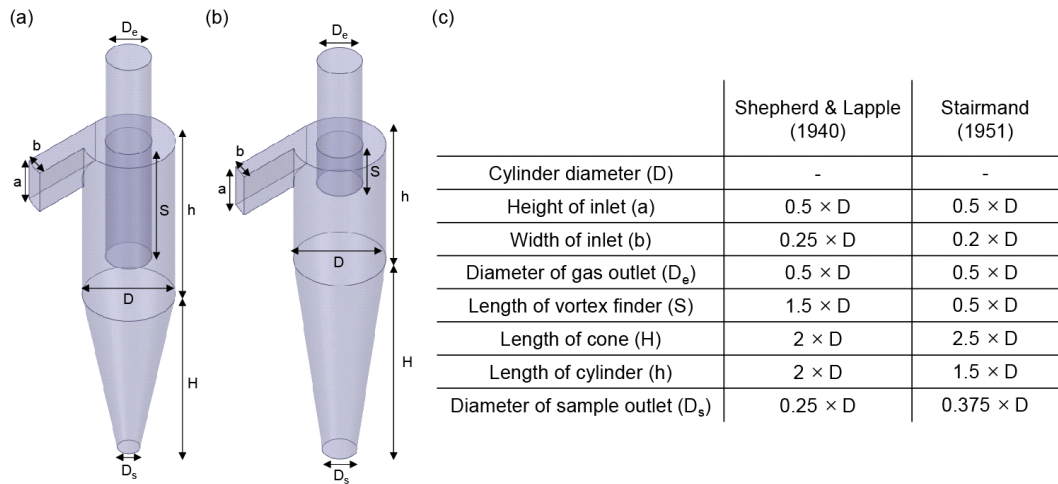


Figure 2. Geometry ratios of the Shepherd & Lapple (1940) and Stairmand(1951) cyclones

본 연구에서는 Shepherd & Lapple과 Stairmand의 사이클론을 복합하여 파라미터를 설정하였다. 사이클론의 공기 유입구의 높이와 공기 배출구는 Shepherd & Lapple을 따라가되, 포집 효율을 증가시키기 위하여 실린더와 콘의 비율을 1:2로 설정하였으며, 공기 유입구를 Stairmand의 사이클론과 같게 하였다. 표 1은 습식 사이클론 설계에 적용된 각 파라미터를 보여준다. 본 연구에서 설계한 사이클론의 직경(D)은 10 mm이다. 설계를 통한 습식 사이클론의 절단 직경은 다음 수식에 의해 계산되었다 (Lapple, 1950).

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi TUC_c(\rho_p - \rho)}} \quad (2)$$

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-\frac{1.1d_p}{2\lambda}}) \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d_m^2} \quad (4)$$

여기서, μ 는 공기 점성 계수, b 는 공기 유입구 폭, U 는 공기 유입구 속도, C_c 는 입자 미끄럼 계수, ρ_p 는 입자의 밀도, ρ 는 공기 밀도, T 는 볼텍스 회전수, d_p 는 입자의 직경, λ 는 평균 자유 이동 거리, n 은 분자의 농도, d_m 은 분자의 충돌 직경이다. 이때의 볼텍스 회전수

는 다음 수식을 사용하여 구할 수 있다.

$$T = \frac{1}{a} \times \left(h + \frac{H}{2} \right) \quad (5)$$

여기서, a 는 유입구 높이, h 는 사이클론 실린더의 길이, H 는 사이클론 콘의 길이이다.

2.2 공기 유동 및 난류 모델링

수치해석은 상용 CFD 해석 프로그램인 ANSYS FLUENT 2021 R1을 사용하였다. 작동 압력과 온도를 각각 101.3 kPa, 300 K로 설정하였다. 액체 주입은 수치해석에서 고려되지 않았다.

사이클론으로 유입된 입자의 궤적 및 포집 효율을 구하기 위해 FLUENT에 내장된 입자 해석 코드인 Discrete Phases Models (DPM) 방정식을 사용하였다.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = F_d(\vec{u} - \vec{v}) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (6)$$

$$F_d = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_c} \quad (7)$$

여기서, \vec{v} 는 입자의 속도, $F_d(\vec{u} - \vec{v})$ 는 입자의 단위 질량당 항력, g 는 중력 가속도, F_d 는 항력, μ 는 공기의 점성 계수이다.

u 는 유체의 속도이고 다음과 같은 운동 방정식인 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)를 사용하여 계산되었다.

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\overline{\rho u_i})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\rho u_i u_j})}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, \vec{x} 는 방향 벡터이고, p 는 압력이다. 레이놀즈 응력 (Reynolds stress, $\overline{\rho u_i u_j}$)을 계산하기 위해 Reynolds stress model (RSM)을 사용하였다. RSM은 ANSYS FLUENT에서 제공하는 난류 해석 모델 중 가장 정교한 유형이며, 사이클론의 회전 유동을 가장 잘 묘사하는 것으로 알려져 있다. RSM은 다음과 같은 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{\rho u_k u_i u_j}) = D_{T,ij} - G_{ij} + \varnothing_{ij} - \epsilon_{ij} \quad (10)$$

좌측 항의 두 식은 각각 시간에 대한 응력과 대류에 대한 함수이다. $D_{T,ij}$ 은 난류 확산에 대한 텐서, G_{ij} 은 부력 생성에 대한 텐서, \varnothing_{ij} 은 압력 변형률에 대한 텐서, ϵ_{ij} 은 소실률에 대한 텐서이다. 해석에 사용된 pressure-velocity coupling scheme, pressure interpolation scheme, momentum equation scheme으로 각각 SIMPLE, PRESTO, QUICK을 사용하였고, 모든 수렴 조건은 10^{-3} 을 적용하였다. 습식 사이클론 내부의 모든 벽면은 no-slip 조건을 적용하였다. Grid independence test를 통해 결정된 격자의 수는 약 6.5만개이다.

식 (4)를 풀어 입자의 속도를 구한 뒤, 입자의 위치는 다음 방정식을 통해 계산할 수 있다.

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \int_n^{n+1} v^{n+1} dt \quad (n \geq 0) \quad (11)$$

여기서, \vec{x}_p 는 입자의 위치 벡터, \vec{v} 는 입자의 속도 벡터, n 은 time step이다.

공기 역학적 직경 0.1 ~ 2 μm 를 가진 입자 약 1400 개를 일정한 분산 상태로 공기 유입구에 15 L/min의

공기 유량으로 공급하였다. 입자의 포집 효율을 계산하기 위하여 사이클론 내부 벽면을 트랩(trap) 조건으로 설정하여 입자가 벽에 충돌하게 되면 100% 포집되도록 하였다. 입자의 포집 효율은 다음 방정식에 의해 계산되었다.

$$\eta_p = \frac{N_{trap}}{N_{particle}} \quad (12)$$

여기서, η_p 은 포집 효율, N_{trap} 은 사이클론 내부 벽면에 포집된 입자의 수, 그리고 $N_{particle}$ 은 사이클론으로 주입된 입자의 수이다.

3. 실험 방법

그림 3은 습식 사이클론 포집기의 입자 포집 효율 측정 실험 장치의 개략도를 보여준다. 입자 발생기로 atomizer (model 9302; TSI Inc., USA)를 사용하였으며, 입자 측정기로는 scanning mobility particle sizer (SMPS) 시스템 (electrostatic classifier (3080; TSI., USA), differential mobility analyzers (DMA) (3081; TSI, USA) 그리고 condensation particle counter (model 3775; TSI., USA))과 aerodynamic particle sizer (APS) (3321; TSI., USA)를 사용하였다. 실험 입자로는 PSL (80 nm, 350 nm, 500 nm, 1.0 μm , 1.5 μm)을 사용하였으며, 사이클론 포집기로 유입되는 유량은 15 L/min으로 고정하였다. 사이클론의 포집 효율 (η_c)은 다음 수식을 사용하여 계산하였다.

$$\eta_c = \left(\frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \right) \times 100 (\%) \quad (13)$$

여기서, C_{inlet} 와 C_{outlet} 은 각각 포집기의 공기 유입구 전단과 공기 배출구 후단에서 측정된 에어로졸의 수 농도이다. 수치해석의 결과와 정확한 비교를 위하여 물을 주입하지 않은 건식 상태의 사이클론 포집 효율도 그림 3과 같은 방법으로 실험을 진행하였다.

그림 4는 습식 사이클론 포집기의 공기 중 박테리아 포집을 위한 실험 장치의 개략도를 보여준다. 실험에 사용한 박테리아는 *S. aureus* (*Staphylococcus Aureus*)이다. 그림 4 (a)는 비교 평가하기 위해 사용된 상용 ATH 포집기인 BioSampler를 실험하기 위한

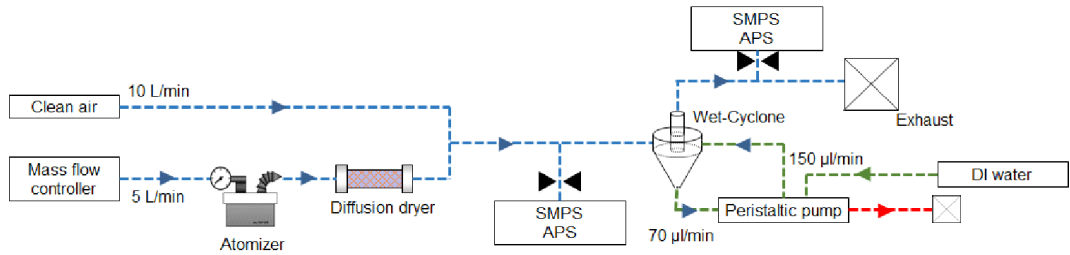


Figure 3. Schematic of experimental setup for collection efficiency of wetcyclone

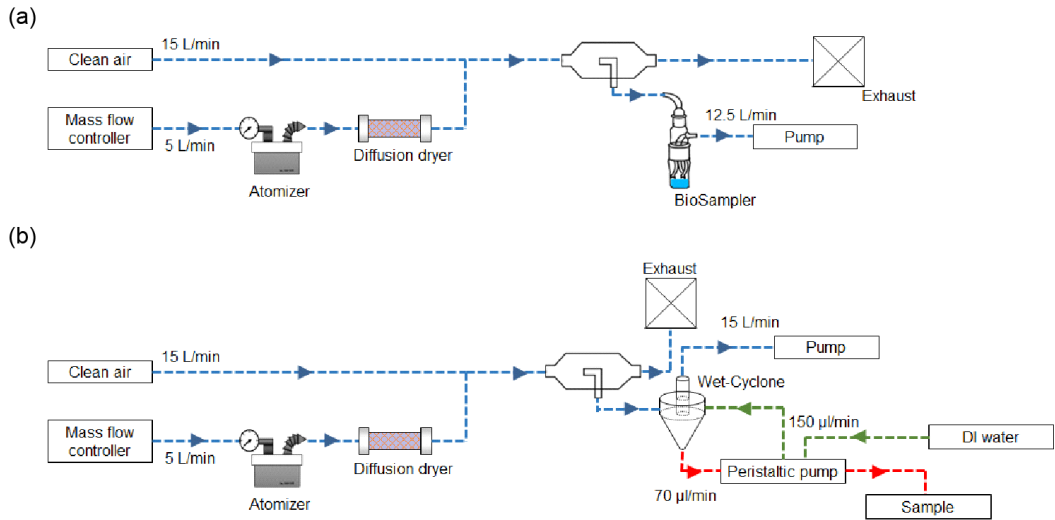


Figure 4. Schematic of the experimental setup for microbial collection

개략도이며 그림 4 (b)는 습식 사이클론의 실험 개략도이다. 각 실험에 사용된 유량은 SKC Biosampler는 12.5 L/min, 습식 사이클론은 15 L/min이며, 포집 시간은 모두 10분으로 설정하였다.

각 포집기의 공기 중 박테리아 농축 성능은 real-time quantitative polymerase chain reaction (qPCR; TCR0096, ThermoScientific)로 확인하였다. PCR은 특정 DNA 조각을 증폭하는 기술로, 증폭하는 주기에 따라 신호 값 (RFU; Relative fluorescence units)이 증가하게 된다. CT값은 타겟 DNA의 양이 증폭되어 기준값 (임계값)에 도달하는 주기를 의미한다. 포집된 박테리아의 DNA는 PowerPrep Quick DNA추출 키트 (E0007, Kogenebiotech, Korea)를 사용하여 추출하였다. 추출된 DNA 샘플은 qPCR에 사용되었으며, S. aureus DNA에 적합한 실시간 PCR 키트 (R0103,

Kogenbiotech, Korea)를 사용하였다. DNA 추출과 qPCR 검출 과정은 키트 제조 업체에서 제공한 설명서 대로 진행하였다. qPCR에 대한 열 protocol은 다음과 같다: (1) uracil DNA glycosylase 활성화 단계는 50°C에서 2분, 95°C에서 10분, 95°C에서 40 사이클 (cycle)의 초기 변성 단계는 15초, 60°C에서 1분 동안 어닐링 (annealing) 및 확장한다. qPCR에서 얻은 사이클 임계 (CT) 값은 BioSampler와 습식 사이클론의 농축비를 비교하는 데 사용되었다.

$$E_{BioSampler} = (1 + E)^{(CT_{Biosampler-kit} - CT_{Biosampler})} \quad (14)$$

$$E_{wetcyclone} = (1 + E)^{(CT_{wetcyclone-kit} - CT_{wetcyclone})} \quad (15)$$

$$\frac{E_{BioSampler}}{E_{wetcyclone}} = (1 + E)^{(CT_{Biosampler} - CT_{wetcyclone})} \quad (16)$$

여기서, $CT_{BioSampler}$ 와 $CT_{wetcyclone}$ 은 공기 중 박테리아 포집 후의 CT 값이다. E 는 qPCR의 효율을 의미한다 ($E=1$) (Kim et al., 2020).

포집된 용액의 박테리아 회수율 평가를 수행하였다. 회수율은 BioSampler와 비교 평가로 진행되었으며, BioSampler는 높은 박테리아 포집 효율과 회수율로 인해 바이오에어로졸 포집을 위한 기준 포집기로 널리 사용되고 있다 (Daher et al., 2011; Wu et al., 2015). 포집된 박테리아를 Tryptic soy agar (TSA)에 일정 비율로 희석하고 미생물 배양기에서 37 °C로 24 시간 동안 배양하였다. 배양 후 TSA 배지 위의 콜로니 (Colony)를 계수하여 다음 수식으로 미생물 회수율을 계산하였다 (Jeong et al., 2021).

$$AP_{BioSampler} = \frac{CFU_{BioSampler}}{C_{BioSampler - inlet}} \quad (17)$$

$$AP_{wetcyclone} = \frac{CFU_{wetcyclone}}{C_{wetcyclone - inlet}} \quad (18)$$

$$C_{sampling} = C_{inlet} \times Q_{sampling} \times \eta \times \frac{\Delta t}{V} \quad (19)$$

$$Microbial\ recovery\ rate = \frac{AP_{wetcyclone}}{AP_{BioSampler}} \times 100 (\%) \quad (20)$$

여기서, $AP_{BioSampler}$ 는 Biosampler에서의 활성 박테리아 비율, $AP_{wetcyclone}$ 은 습식 사이클론에서의 활성 박테리아 비율, $CFU_{BioSampler}$ 와 $CFU_{wetcyclone}$ 는 각 포집기에서의 생존한 미생물의 농도, $C_{sampling}$ 은 포집된 총 입자의 수 농도, Δt 는 포집 시간이다. 상용 액상 포집기인 BioSampler의 박테리아 포집 효율은 1로 가정하였다 (Lin et al., 2000).

4. 결과 및 토의

4.1 수치해석 및 실험적 검증

그림 5는 사이클론 내부의 압력 분포를 보여준다. 사이클론 내부에서 공기와 입자는 회전 원심력에 의하여 분리되며, 입자가 벽에 충돌하게 되면서 포집된다. 이로 인하여 중심부에는 상대적으로 낮은 압력이 형성되

고, 공기와 입자에 작용되는 회전 원심력은 사이클론의 중심부에서 외부 방향으로 향하게 된다. 그림 6은 사이클론에 주입한 입자의 유동과 크기 별 입자 포집 위치를 보여준다. 입자의 크기가 클수록 공기의 유동을 따라가지 못하고 회전 원심력에 의하여 더 많이 포집되는 것을 확인할 수 있다.

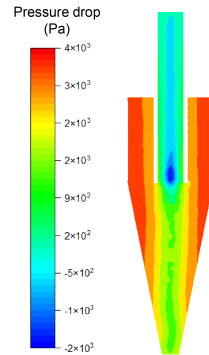


Figure 5. Numerical results of pressure drop distribution

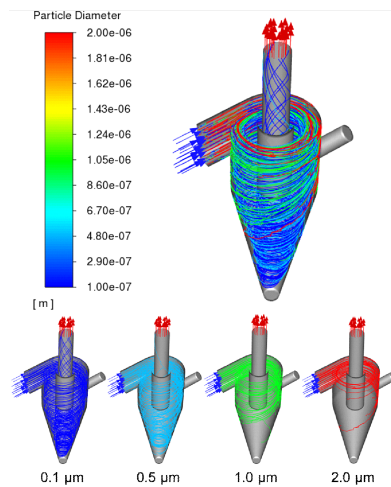


Figure 6. Location of particle collection by flow and size of particles injected into the cyclone

그림 7은 입자의 크기에 따른 사이클론의 포집 효율을 나타낸 것이다. 식 (2)를 통해 설계된 사이클론의 절단 직경은 0.16 μm임을 알 수 있으며, 이를 수치해석으로 사이클론의 절단 직경을 해석하였다. 수치해석 결과 0.2 μm의 절단 직경을 가진 것으로 확인되었다. 실험

결과 건식 사이클론의 0.08 μm 에서 경우 19.40%의 포집 효율을 보였으며, 습식 사이클론의 경우 0.08 μm 에서 66.67%의 포집 효율을 보였다. 따라서 실험을 통한 습식 사이클론의 절단 직경은 0.08 μm 보다 작은 것을 알 수 있다. 이와 같이 절단 직경이 식 (2)를 통한 절단 직경과 수치해석을 통한 절단 직경보다 작게 나타났다. 액막으로 인하여 내벽의 두께가 형성되어 차압이 증가하게 되어 원심력의 영향이 더 강해지기 때문이며, 액막의 표면 장력으로 인한 입자의 재비산(rebounding)이 감소하기 때문이다 (Antonyuk et al, 2009).

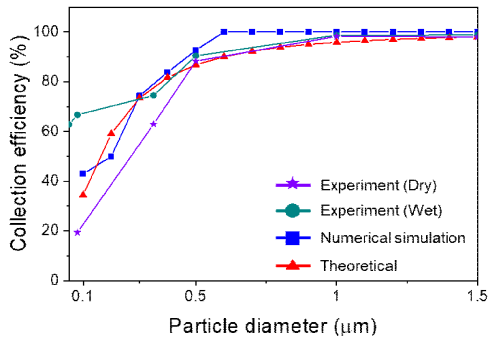


Figure 7. Comparison of collection efficiency numerical and experimental results

4.2 상용 장비와 비교 검증

그림 8은 공기 중으로 발생시킨 박테리아의 크기 분포를 보여주며, 표 2는 공기 중으로 발생시킨 박테리아의 크기와 총 수 농도를 보여준다. 발생된 박테리아의 기하학적 평균 직경 (GMD; Geometric mean diameter)는 약 0.77 μm 정도로 동일하며, 최대 크기 (Mode diameter) 또한 0.8 μm 로 동일하였다. 공기 중으로 발생시킨 박테리아의 농도는 습식 사이클론 포집 실험에서 411 개/ cm^3 , Biosampler의 포집 실험에서 439 개/ cm^3 의 평균 농도를 가졌다.

Table 2. Airborne bacteria size and total number concentration each test

	Wetcyclone	Biosampler
Mode diameter (μm)	0.78 (± 0.000)	0.83 (± 0.000)
GMD (μm)	0.76 (± 0.003)	0.78 (± 0.001)
GSD	1.22 (± 0.001)	1.23 (± 0.000)
Total particle concentration (particles/ cm^3)	411.35 (± 4.554)	439.49 (± 21.045)

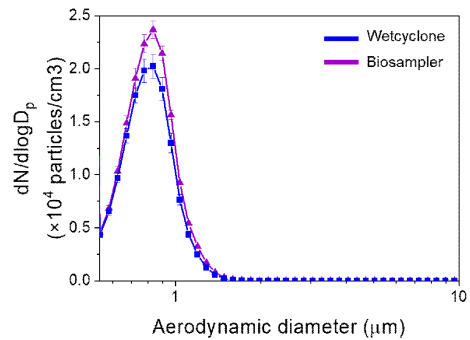


Figure 8. Size distribution and total concentration of airborne bacteria

Table 3. Collected particle concentration, CT value, and colony concentration for ATH samplers

	Wet-cyclone	Biosampler	Improved Cyclone Performance
Collected particle concentration (particles/ml)	8.8×10^7	2.7×10^6	$\times 32.6$
qPCR CT value	20.80	25.12	$\times 27.9$
Colony forming unit (CFU/ml)	4.6×10^6	1.8×10^5	$\times 25.6$

*Sampling time: 10 min

표 3은 습식 사이클론과 BioSampler 포집기로 포집된 총 박테리아 수 농도, qPCR의 CT값과 박테리아 콜로니 농도를 보여준다. 포집된 전체 박테리아의 수 농도를 계산하기 위해 식 (1)을 사용하였다. 습식 사이클론과 BioSampler가 각각 8.8×10^7 particles/mL, 2.7×10^6 particles/mL이다. 식 (1)의 농축비를 고려하였을 때, 약 32.6배 입자 포집 농도 높아야 한다. 하지만, PCR의 CT값을 도출하여 총 GC의 상대적 비교를 진행한 결과, 포집 후 측정된 CT값은 습식 사이클론이 20.80이고 BioSampler는 25.12였다. 따라서, 식 (16)에 의해 습식 사이클론의 ATH 농축 성능 BioSampler 대비 27.9 배이다. 식 (1) 대비 손실이 발생하였다는 것을 알 수 있다. 즉, 습식 사이클론의 농축비는 1.7×10^5 이다. 식 (17) - (20)으로 습식 사이클론은 BioSampler 대비 81.9 %의 회수율을 가진다. 따라서, 습식 사이클론은 실내 공기의 저농도 (>100 CFU/ m^3)으로 존재하는 박테리아를 높은 ATH 농축과 안정적인 회수를 통해 배양법과 생화학적 (PCR, ELISA, ATP 등) 방법에 연속적으로 짧은 시간에 LOD를 충족하는 샘플 농도로 제공할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 실시간 공기 중 박테리아 검출을 위한 습식 사이클론을 개발하여 수치해석과 실험을 통해 성능을 입증하였다. 수치해석과 표준 입자 실험을 통해 공기 중 박테리아 크기 ($0.8 \mu\text{m}$)의 포집 효율이 $> 90\%$ 임을 확인하였다. 입자 계수 방법과 PCR 검출을 통해 ATH 농축 성능 (BioSampler 대비 27.9배)을 확인하였고, 이를 qPCR을 통해 실험적으로 확인하였다. 또, 미생물 배양법으로 안정적인 미생물 회수율 (BioSampler 대비 81.9%)을 가진다는 것을 확인하였다. 따라서, 본 연구로 개발된 습식 사이클론은 공기 중 저농도로 존재하는 박테리아를 고농축 포집하기 위해 사용될 수 있으며, 다양한 바이오에어로졸 모니터링 연구에 적용될 수 있을 것이다.

감사의 글

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

References

- Antonyuk, S., Heinrich, S., Deen, N., & Kuipers, H. (2009). Influence of liquid layers on energy absorption during particle impact. *Particuology*, 7(4), 245-259., <https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.04.006>
- Burger, H. (1990). Bioaerosols: prevalence and health effects in the indoor environment. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 86(5), 687-701., [https://doi.org/10.1016/S0091-6749\(05\)80170-8](https://doi.org/10.1016/S0091-6749(05)80170-8)
- Bush, R. K., & Portnoy, J. M. (2001). The role and abatement of fungal allergens in allergic diseases. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 107(3), S430-S440., <https://doi.org/10.1067/mai.2001.113669>
- Corman, V. M., Landt, O., Kaiser, M., Molenkamp, R., Meijer, A., Chu, D. K., ... & Drosten, C. (2020). Detection of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) by real-time RT-PCR. *Eurosurveillance*, 25(3), 2000045., <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.3.2000045>
- Dabrazhynetskaya, A., Volokhov, D. V., David, S. W., Ikononi, P., Brewer, A., Chang, A., & Chizhikov, V. (2011). Preparation of reference strains for validation and comparison of mycoplasma testing methods. *Journal of applied microbiology*, 111(4), 904-914., <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.05108.x>
- Daher, N., Ning, Z., Cho, A. K., Shafer, M., Schauer, J. J., & Sioutas, C. (2011). Comparison of the chemical and oxidative characteristics of particulate matter (PM) collected by different methods: filters, impactors, and biosamplers. *Aerosol Science and Technology*, 45(11), 1294-1304., <https://doi.org/10.1080/02786826.2011.590554>
- Douwes, J., Thorne, P., Pearce, N., & Heederik, D. (2003). Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects. *The Annals of occupational hygiene*, 47(3), 187-200., <https://doi.org/10.1093/annhyg/meg032>
- 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>
- Hong, S., Bhardwaj, J., Han, C. H., & Jang, J. (2016). Gentle sampling of submicrometer airborne virus particles using a personal electrostatic particle concentrator. *Environmental Science & Technology*, 50(22), 12365-12372., <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03464>
- Jeong, S. B., Ko, H. S., Heo, K. J., Shin, J. H., & Jung, J. H. (2022). Size distribution and concentration of indoor culturable bacterial and fungal bioaerosols. *Atmospheric Environment: X*, 15, 100182., <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100182>
- Jeong, S. B., Heo, K. J., Ko, H. S., Ahn, J. P., Lee, S. B., & Jung, J. H. (2021). Evaluation of survival rates of airborne microorganisms on the filter layers of commercial face masks. *Indoor air*, 31(4), 1134-1143., <https://doi.org/10.1111/ina.12816>
- Kairova, M., & Rakhimzhanova, D. (2021). Molecular genetic techniques and oligonucleotides for mycoplasma identification—a review.

- Acta Veterinaria Brno, 89(4), 317-332.,
<https://doi.org/10.2754/avb202089040317>
- Kim, H. R., An, S., & Hwang, J. (2020). Aerosol-to-hydrosol sampling and simultaneous enrichment of airborne bacteria for rapid biosensing. *ACS sensors*, 5(9), 2763-2771.,
<https://doi.org/10.1021/acssensors.0c00555>
- Korea Ministry of Environment (KME) (2018). Enforcement Rules of the Indoor Air Quality Control Act.
- Lapple, C. E. (1950). Gravity and centrifugal separation. *American Industrial Hygiene Association Quarterly*, 11(1), 40-48.,
<https://doi.org/10.1080/00968205009344283>
- Lee, S. A., & Liao, C. H. (2014). Size-selective assessment of agricultural workers' personal exposure to airborne fungi and fungal fragments. *Science of the total environment*, 466, 725-732.,
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.104>
- Lin, X., Reponen, T., Willeke, K., Wang, Z., Grinshpun, S. A., & Trunov, M. (2000). Survival of airborne microorganisms during swirling aerosol collection. *Aerosol Science & Technology*, 32(3), 184-196.,
<https://doi.org/10.1080/027868200303722>
- Oh, J., Choi, J., Massoudifarid, M., Park, J. Y., Hwang, J., Lim, J., & Byeon, J. H. (2023). Size-classified monitoring of ATP bioluminescence for rapid assessment of biological distribution in airborne particulates. *Biosensors and Bioelectronics*, 115356.,
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2023.115356>
- Rao, C. Y., Burge, H. A., & Chang, J. C. (1996). Review of quantitative standards and guidelines for fungi in indoor air. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46(9), 899-908.,
<https://doi.org/10.1080/10473289.1996.10467526>
- Sgrott Jr, O. L., Noriler, D., Wiggers, V. R., & Meier, H. F. (2015). Cyclone optimization by COMPLEX method and CFD simulation. *Powder Technology*, 277, 11-21.,
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.039>
- Shepherd, C. B., & Lapple, C. E. (1940). Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors cyclone without intel vane. *Industrial & Engineering Chemistry*, 32(9), 1246-1248.,
<https://doi.org/10.1021/ie50356a012>
- Stairmand, C. J. (1951). The design and performance of cyclone separators. *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 29, 356-383.
- Sung, G., Kim, H. U., Shin, D., Shin, W. G., & Kim, T. (2018). High efficiency axial wet cyclone air sampler. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(10), 2529-2537.,
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.12.0596>
- Tan, M., Shen, F., Yao, M., & Zhu, T. (2011). Development of an automated electrostatic sampler (AES) for bioaerosol detection. *Aerosol Science and Technology*, 45(9), 1154-1160.,
<https://doi.org/10.1080/02786826.2011.582193>
- Weber, S., Greiner, R., Bartes, A., Kavermann, H., Knack, Y., & Deutschmann, S. (2021). Validation of the MycoTOOL mycoplasma real-time PCR kit.
- Wu, Y., Shen, F., & Yao, M. (2010). Use of gelatin filter and BioSampler in detecting airborne H5N1 nucleotides, bacteria and allergens. *Journal of Aerosol Science*, 41(9), 869-879.,
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.05.006>