

# Study on Development of Bio-aerosol Reduction System using Electrochemical Nano-bubble Technology

## 전기화학적 나노 버블 기술을 이용한 바이오에어로졸 저감장치 개발 연구

Inseol Yeo<sup>1</sup>, Chan Gyu Park<sup>2</sup>

여인설<sup>1</sup>, 박찬규<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Associate Researcher, Environmental Technology Division, Korea Testing Laboratory, Korea, [isyeo@ctl.re.kr](mailto:isyeo@ctl.re.kr)

<sup>2</sup> Principal Researcher, Environmental Technology Division, Korea Testing Laboratory, Korea, [parkcg@ctl.re.kr](mailto:parkcg@ctl.re.kr)

Corresponding author: Chan Gyu Park

**Abstract:** Bioaerosol refers to a state in which biological factors are dispersed as fine particles in a gaseous environment. It has been reported that it not only pollutes indoor air quality but is also included in outdoor atmospheric aerosols, affecting the spread of contagious diseases. Therefore, it is necessary to develop technologies to effectively detect and reduce it. In this study, a nanobubble generating system was developed using the potential energy of nanobubbles and applying an electrochemical process using DSA electrodes for concentrating negative ions on the surface to increase the residence time by improving the stability of nanobubbles. In addition, an air purification system for reducing bioaerosols was developed, and the reduction trend was confirmed through the analysis of ATP activity of *Staphylococcus epidermidis*, and performance evaluation were performed to optimize operating conditions through airborne microorganism and airborne virus reduction chamber tests. The nanobubble generator was operated under the optimal operating conditions derived from previous research. Experiment were conducted to select the contact method of nanobubbles and bioaerosol in the air purification system, the amount of air flow, and the input amount of feed water. As a result of the experiments, the reduction efficiency trends were changed according to the level of nano-bubble water in the air purification system reaction tank and the amount of air flow. It was confirmed that the method of directly contacting the bioaerosol to the nanobubbles was efficiently reduced compared to the method of spraying the nanobubbles. Finally, the experiment was carried out by spraying and direct contact mixing, and the optimal operating conditions were selected as nanobubble nozzle spraying amount of 10 L/min, blowing amount of 2.25 m<sup>3</sup>/min, and supply water amount of 40 L. When operating the system for 10 minutes, *Staphylococcus epidermidis* showed a reduction efficiency of about 99% or more, showing the highest reduction tendency. In addition, as a result of the reduction efficiency test of airborne microorganisms and airborne viruses through chamber accreditation tests, it was confirmed that each was reduced by more than 99.9%, and bioaerosols were effectively reduced through the device developed in this study.

**Keywords:** Bio-aerosol, Nano Bubbles, Electrochemical Process, Air Purification System, Performance

Received: November 23, 2022; 1<sup>st</sup> Review Result: January 06, 2023; 2<sup>nd</sup> Review Result: February 05, 2023  
Accepted: February 28, 2023

## Evaluation

**요약:** 바이오에어로졸(bioaerosol)은 기체환경에 생물학적 인자들이 미세한 입자로 분산된 상태를 말하며, 실내공기 질을 오염시킬 뿐만 아니라 실외 대기 에어로졸에도 포함되어, 국내외에서 전염성 질병 등의 확산에 영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서 이를 효과적으로 검출하고 감소시키는 기술 개발이 필요하며, 본 연구에서는 나노 버블의 잠재 에너지를 활용하고, 나노 버블의 안정성 향상을 통한 체류시간 증가를 위해 표면의 음이온 집약을 위한 DSA 전극을 이용한 전기화학적 공정을 적용한 나노 버블 발생 시스템을 제작하였다. 또한, 이와 연계한 바이오에어로졸 저감용 공기정화 시스템을 제작하여 표피포도상 구균의 ATP 활성도 분석을 통한 저감 경향을 확인하고, 부유 미생물 및 부유 바이러스 저감 챔버 시험을 통해 운영 조건 최적화를 위한 성능평가를 수행하였다. 나노 버블 발생장치는 선행연구를 통해 도출된 최적 운영 조건으로 가동하였으며, 공기 정화시스템 내 나노 버블과 바이오에어로졸의 접촉 방식, 송풍량 및 공급수 공급량 선정을 위한 시험을 수행하였다. 실험 결과, 공기정화 시스템 반응조 내 나노 버블수의 수위 및 송풍량에 따라 저감 효율 경향이 변하였으며, 나노 버블을 분사하는 방식에 비해 바이오에어로졸을 직접 나노 버블에 접촉하는 방식이 효율적으로 저감되는 것을 확인하였다. 최종적으로 분사 및 직접 접촉하는 혼합 방식으로 나노 버블의 노즐 분사량 10 L/min, 송풍량 2.25 m<sup>3</sup>/min, 공급수량 40 L로 최적 운영 조건으로 선정하였으며, 10 분간 운영한 결과, 약 99% 이상의 저감효율을 보이며, 가장 높은 저감 경향을 보였다. 또한, 챔버 공인시험을 통해 부유 미생물과 부유 바이러스의 저감 효율 시험을 실시한 결과, 99.9% 이상이 저감되며 본 연구에서 개발한 장치를 통해 효과적으로 바이오에어로졸이 저감됨을 확인하였다.

**핵심어:** 바이오에어로졸, 나노 버블, 전기화학적 공정, 공기정화 시스템, 성능평가

## 1. 서론

산업화 및 도시화로 인해 현대인들의 실내 공간 거주 시간이 증가하고, 밀폐된 공간에서 타인과 빈번하게 접촉할 수밖에 없는 환경에 노출되고 있다.

바이오에어로졸(bioaerosol)은 기체 환경에 약 0.02 ~ 100  $\mu\text{m}$  크기의 생물학적 인자들이 미세한 입자로 분산된 상태를 말하며, 실내 공간에서의 작업 및 생활환경 등 인위적 환경오염에 의해 전파되고 생성된다. 또한, 대기 중에 오래 체류함에 따라 실내공기 질을 오염시킬 뿐만 아니라, 실외 대기의 에어로졸에도 포함되어, 전염성 질환을 확산시킬 수 있어 국내·외에서 부정적인 측면이 보고되고 있다. 특히, 바이오에어로졸은 감염자의 비말 접촉 등으로 인해 흡입되어 대감염 및 대유행(pandemic)을 일으킬 수 있어, 이를 신속하게 검출하고 제어할 수 있는 기술의 필요성이 점점 증대되고 있다[1-3].

실내 대기질 바이오에어로졸 제거를 위한 직접 살균을 위한 소독제, 여과/집진 방식의 공기정화장치 등의 다양한 기술개발이 이루어지고 있으나, 집진 혹은 공기청정기의 필터 등에 여과된 바이오에어로졸이 죽지 않고 서식하면서 냄새를 유발하고 실내로 재확산, 재유입되는 문제가 발생하고 있다. 이를 멸균하는 기술로 열에너지, 광 에너지, 전기 이온, 라디칼 산화, 멸균 필터 및 화학합성 소독제 등의 기술이 적용되고 있으나, 반응속도, 국부적인 살균력, 높은 에너지 소모량, 인체 유해성 등의 문제가 제기되고 있으며, 이를 해결하기 위한 방안으로 나노 버블을 이용한 기술이 연구되고 있다[4-6].

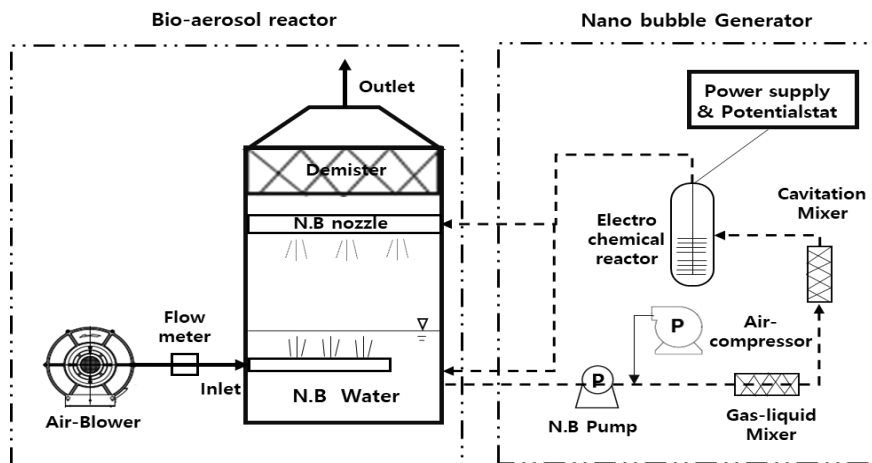
미세 버블은 100  $\mu\text{m}$  미만의 크기를 가진 매우 작은 버블을 말하며, 크기 및 발생량 등에 따라 활용 기능성과 적용 특성이 다르기 때문에, 정의의 기준은 다를 수 있으나, 나노 버블은 일반적으로 1  $\mu\text{m}$  이하 크기로 정의하고 있다. 나노 버블은 크기가 작을수록 내부압력 증가와 함께 기체 용해율을 증가시키고, 비표면적의 증가로 인해 물질 전달률 및 세정 효율이 증가하는 기술로, 표면의 많은 이온이 둘러싸여 버블이 안정화되고 잔류성이 높아진다. 또한, 표면 전하 증가와 기체가 과열되는 순간 높은 에너지 및 라디칼이 생성되어 이러한 버블의 자연적 폭발(bursting), 결합(coalescence)과 수축(contraction)에 의한 인위적 폭발 및 표면 전하를 이용한 충격, 자체 파괴 등에 의한 소독 메커니즘 등이 규명되고 있어 수질정화, 세정, 살균 설비 등 다양한 응용 분야에 적용되어 연구되고 있다[7-12].

본 연구에서는 나노 버블이 갖고 있는 잠재 에너지를 활용하고 버블의 안정성 향상을 위해 버블 표면의 음이온 집약을 위한 전기화학적 공정이 적용된 나노 버블 생성장치를 제작하였으며[13], 바이오에어로졸의 저감을 위해 스크러버 방식의 나노 버블 습식 공기정화장치를 제작, 연계한 일체형 통합시스템을 구축하여 바이오에어로졸 내 미생물의 저감 성능평가 및 최적화 운영 조건 도출 선정을 위한 연구를 수행하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에서는 바이오에어로졸 내 미세입자 및 미생물의 저감을 위해 전기화학적 공정이 적용된 나노 버블 발생장치 및 공기정화장치를 제작하였으며, 실험을 위한 장치의 구성 및 사양은 [그림 1], [표 1]과 같다. 나노 버블 발생장치는 수돗물, 증류수 등을 이용하여 기체를 순간적으로 액체에 용해해 1  $\mu\text{m}$  이하 크기의 나노 버블(초미세 버블)을 생성시켜 머물게 할 수 있도록 하며, 나노 버블의 기체-액체 경계면에 음이온을 집약하기 위한 DSA(dimensionally stable anode) 전극(Cathod: Ti, Anode: Ir-Ru-Ti)을 활용한 전기화학적 공정이 포함되어 구성된다. 공기정화장치 내 하부에는 공급수를 채워 지속해 나노 버블 발생장치로 순환시켜 나노 버블수가 생성 및 체류하게 되며, 반응조 중단에서는 나노 버블이 노즐을 통해 분사되고, 상부에는 충전제를 배치할 수 있는 데미스터로 구성된다.



[그림 1] 바이오에어로졸 저감 실험 모식도

[Fig. 1] Schematic Diagram of Bio-aerosol Reduction Experiment

[표 1] 바이오에어로졸 저감 시스템 사양

[Table 1] Bio-aerosol Reduction System Specification

Spec.		Description	Spec.		Description
Nano Bubble Pump (circulation)		(Max) 20 L/min	Air Blower		(Max) 2.5 m3/min
Electro chemical reactor	Electrode	Cathod: Ti, Anode: Ir-Ru-Ti (mesh type) 50 (mm) x 50 (mm), 10 set	Bio-aerosol Reactor		STS 304, Φ500 x 1000 (mm)
	Reactor	STS 304, Φ100 x 200 (mm)			

## 2.2 실험재료 및 시약

본 연구에서 바이오에어로졸 저감 시스템의 최적 운영 조건 선정을 위해 사용한 표피포도상 구균은 실내 환경에서 흔하게 발견되며, 사람의 피부에서도 발견되는 그람 양성균으로 *Staphylococcus epidermidis* ATCC 12228 균주를 ATCC (American Type Culture Collection, USA)에서 구매하여 사용하였다. 균주는 Fluid Thioglycollate Medium (DifcoCo, USA) 액체 배지에 0.1 mL 접종한 후, 37 °C 배양기에서 18시간 동안 정치배양 하였다.

챔버 시험에서는 미생물 저감 성능평가를 위해 *Staphylococcus epidermidis* ATCC 12228 균주를 사용하였으며, 바이러스의 저감 성능평가를 위해 Bacteriophage Phi-X174 ATCC 13706-B1과 *Escherichia coli* ATCC 13706을 숙주 세균으로 사용하였다.

## 2.3 실험 방법

본 연구에서 제작된 나노 버블 발생장치를 통해 생성된 버블의 크기와 밀도 분석은 나노 입자크기 및 농도 시각화 측정 장비인 NS300 (Malvern, UK) 장비를 사용하였으며, 나노 버블 발생장치는 선행연구를 통해 도출된 최적 운영조건 (①공급수 순환유량 - 20 L/min, ② 공급수 - 수도수, ③ 공기주입량 - 80 mL/min, ④ DSA 전극 전류밀도 - 120 A/m<sup>2</sup>) 하에서 가동하였다.

나노 버블 발생장치와 연계된 공기정화장치의 성능평가는 송풍기를 통해 유입되는 바이오에어로졸을 나노 버블과 접촉하는 방식(①나노 버블수로 직접 접촉, ②나노 버블 노즐을 통한 분사 접촉) 및 송풍량 조건에 따라 저감 효율 경향성을 확인하였으며, 이는 Lumitester(Kikkoman, Japan) 장비를 사용하여 표피포도상 구균의 ATP 활성도를 측정하였다.

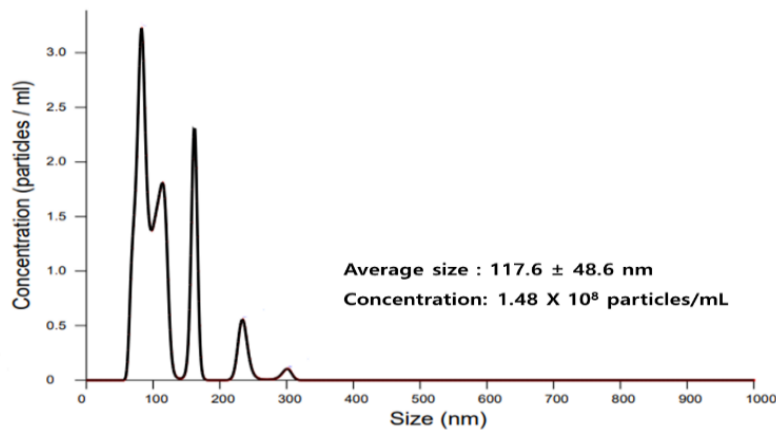
또한, 저감 경향 분석을 통해 도출한 최적 운영 조건 결과를 토대로 국제표준 ISO 16000-36:2018에 따라 부유 미생물과 부유 바이러스 챔버 시험을 수행하였으며, 이의

농도 분석은 에어샘플러 MAS-100NT(MERCK, Germany) 장비를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 나노 버블 특성평가

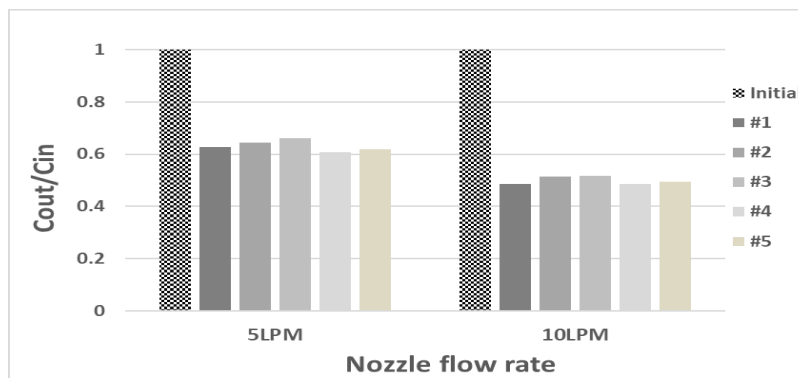
나노 버블의 평균 크기와 밀도 분석을 위해 20 L의 공급수를 공기 주입량 80 mL/min, 순환 유량 20 L/min 로 5분 간 순환하여 분석한 결과, [그림 2]와 같이 평균 크기분포  $117.6 \pm 48.6$  nm, 밀도  $1.48 \times 10^8$  particles/mL 로 나타났다.



[그림 2] 나노 버블 평균 크기 및 밀도 특성분석

[Fig. 2] Characteristics Nano-bubbles Average Size and Concentrations

#### 3.2 나노 버블 분사접촉 성능평가



[그림 3] 나노 버블 노즐 분사량에 따른 바이오에어로졸 저감 경향

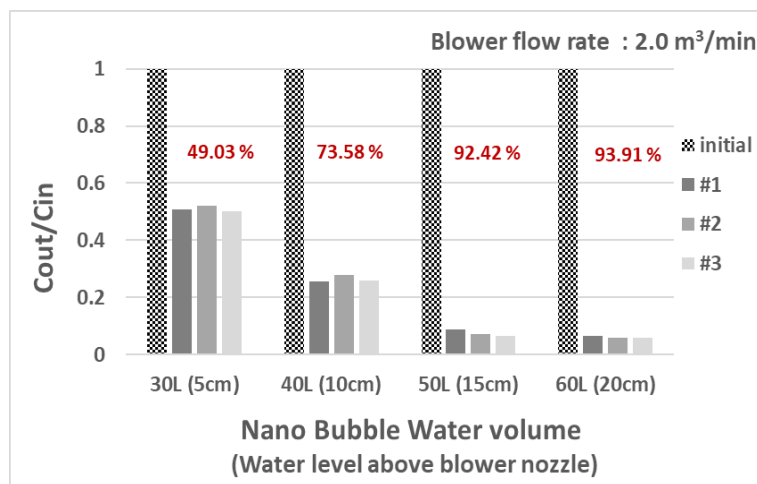
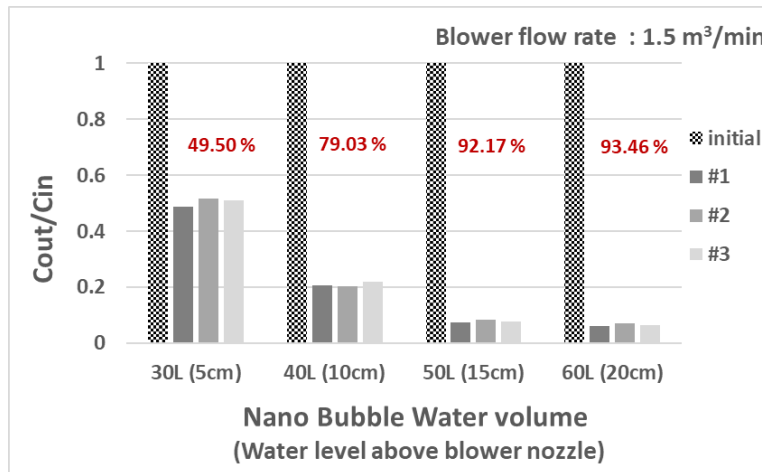
[Fig. 3] Bio-aerosol Reduction Tendencies Depending on the Spray Amount of Nano-bubble from Nozzles

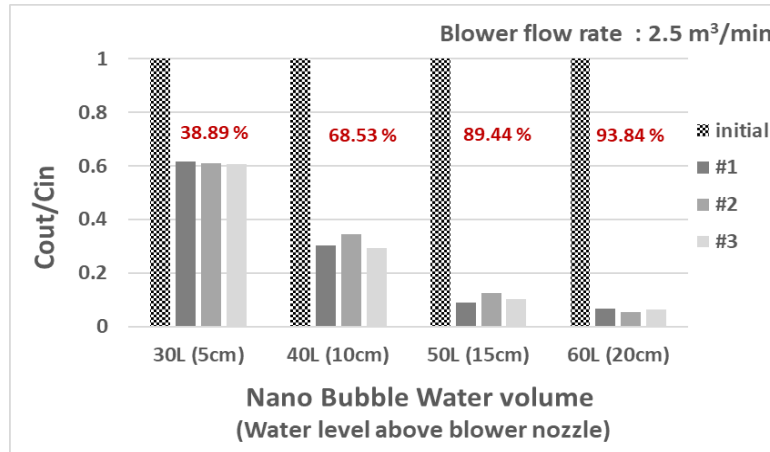
공기정화장치에 공급되는 수도수는 반응조 하부에서 나노 버블 발생장치를 지속적으로 순환하며 나노 버블수로 체류하고, 일부는 상부의 노즐을 통해 분사되며 순환한다.

공기정화장치를 순환하는 나노 버블수의 전체 순환유량은 20 L/min이며, 개폐식 벨브 조절을 통해 노즐 분사 여부 및 유량을 설정할 수 있다. 본 실험에서는 송풍기를 통해 유입되는 공기의 분사 노즐 아래로 수도수를 채워 바이오에어로졸이 나노 버블수 내로 분사되어 접촉하지 않고, 상단 노즐에서 분사되는 나노 버블에 의한 저감효율만을 비교 실험하였다. 노즐 분사량은 5, 10 L/min으로 설정하였으며, 작동 10분 후 배출구를 통해 유출되는 공기를 포집하여 ATP 분석을 실시(조건별 5회)하였다. 실험 결과, [그림 3]과 같이 각 조건에서 약 40% (5 L/min), 51% (10 L/min)의 최대 저감효율을 보이며, 분사량이 높을 때 저감효율이 높아지는 경향을 보였다.

### 3.3 나노 버블 기액 직접접촉 성능평가

본 실험에서는 상단 노즐에서의 나노 버블의 분사 없이 송풍기를 통해 유입되는 공기를 나노 버블수에 직접 분사하여 송풍 유량에 따른 기액 접촉에 의한 저감 효율을 실험하였다. 송풍 유량 1.5, 2.0, 2.5 m<sup>3</sup>/min, 나노 버블수 용량 30, 40, 50, 60 L로 설정하여 비교실험 하였으며, 나노 버블수의 용량은 송풍기 노즐 위 수면 높이에 따라 구분하였다. 각 시험의 결과는 작동 10분 후 배출구를 통해 유출되는 공기를 포집하여 ATP 분석을 실시하였다.





[그림 4] 송풍기 유량 및 나노 버블 수면 높이에 따른 바이오에어로졸 저감 경향

[Fig. 4] Bioaerosol Reduction Tendencies Depending on Blower Flow Rate and Nano-bubble Surface Height

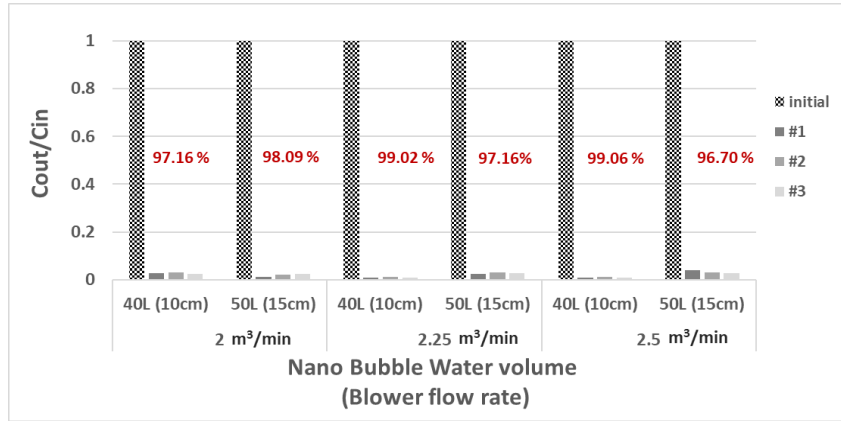
[그림 4]와 같이 나노 버블수 용량이 30 L(노즐 수면 위 5 cm)일 경우, 송풍량에 따라 각각 평균 49.50% (1.5 m³/min), 49.03% (2.0 m³/min), 38.89% (2.5 m³/min)의 제거효율을 보이고, 나노 버블수 용량이 40 L(노즐 수면 위 10 cm)일 경우, 송풍량에 따라 각각 평균 79.03% (1.5 m³/min), 73.58% (2.0 m³/min), 68.53% (2.5 m³/min)의 제거효율을 보였다. 수면이 낮을 경우, 송풍량이 증가할 수록 바이오에어로졸 저감효율은 감소하는 경향을 보이며, 나노 버블 및 바이오에어로졸의 수면 위 비산 및 짧은 접촉 시간에 의해 저감 효율이 감소하는 것으로 판단된다.

나노 버블수 용량이 커질수록 유입되는 공기가 수면 위로 부상되는 시간이 길어지며 바이오에어로졸의 저감 효율은 증가하는 경향을 보이며, 송풍 노즐 위 수면 15 cm 이상에서는 약 90% ~ 94% 저감효율을 보였다. 다만, 송풍량 2.5 m³/min 조건에서 50L 이상의 나노 버블수를 채워 운영 시, 수중 폭기에 의한 수면 상승으로 상단 나노 버블 분사 노즐이 나노 버블수에 잠기게 되어 분사에 의한 혼합 방식을 적용할 수 없었다.

### 3.4 나노 버블 혼합 접촉 방식 성능평가

본 연구에서는 최대 2.5 m³/min 용량의 공기정화장치의 개발을 목표로 하며, 앞의 실험을 통해 나노 버블에 직접 접촉 방식을 통해 높은 효율의 바이오에어로졸의 저감효과를 얻을 수 있었다. 본 실험에서는 나노 버블 직접 접촉방식과 분사 방식을 동시에 수행하여 저감 효율 경향분석을 실시하였으며, 나노 버블 분사량을 10 L/min으로 고정하고, 공기 송풍량 2, 2.25, 2.5 m³/min, 나노 버블수 용량 40, 50 L로 채워 각각의 바이오에어로졸 저감 경향을 분석하였다. 각 시험의 결과는 작동 10분 후 배출구를 통해 유출되는 공기를 포집하여 ATP 분석을 실시하였다. [그림 5]는 조건별 바이오에어로졸의 저감 효율을 보여주며, 혼합방식으로 적용 시, 단독 접촉 방식들에 비해 저감 효율이 증가함을 보였다. 특히, 2.25 m³/min 이상의 송풍량과 송풍 노즐 위 10 cm 수면 위에서 99% 이상의 저감 효율을 보였으나, 수면 높이 15 cm 이상의 나노 버블수를 채울 시, 수중 폭기에 의한 수면 상승으로 상단 나노 버블 분사 노즐이 나노 버블수에 잠기게 되었고, 제거효율이 일부 감소

(1.86 ~ 2.36%)하는 결과를 보였다.



[그림 5] 나노 버블 혼합접촉 방식에서 송풍기 유량 및 나노 버블 수면 높이에 따른 바이오에어로졸 저감 경향

[Fig. 5] Bioaerosol Reduction Tendencies Depending on Blower Flow Rate and Nano-bubble Surface Height in Mixed Nano-bubble Contact Method

### 3.5 챔버 성능평가

선행 연구를 통해 도출된 최적화 운영 조건으로 챔버 실험을 통해 부유미생물 및 부유 바이러스의 저감 성능평가를 수행하였다. 시험 방법은 ISO 16000-36:2018 실내공기 질 챔버 시험 국제표준에 근거하여 수행되었으며, 공급수 40 L를 채운 후 15분간 나노 버블 발생장치를 운영하여 안정화를 실시하고, 송풍량 2.25 m³/min으로 설정하여 30분간 가동 후의 배지 시험을 통해 부유 미생물 및 부유 바이러스의 저감효율을 도출하였다. [표 2]와 같이 실험 결과, 각각 99.9% 이상의 저감효율을 보이며 효과적으로 바이오에어로졸 저감이 됨을 확인하였다.

[표 2] 챔버 시험을 통한 부유 미생물 및 바이러스 저감 시험 결과

[Table 2] Bio-aerosol (Airborne Microbial and Virus) Reduction Test Results Through Chamber Test

Item	Results		
	Initial Concentration	Final Concentration	Reduction rate
Staphylococcus epidermidis ATCC 12228	1.6 x 10 <sup>4</sup> (CFU/m <sup>3</sup> )	< 10 (CFU/m <sup>3</sup> )	99.9 %
Bacteriophage Phi-X174 ATCC 13706-B1	3.2 x 10 <sup>4</sup> (PFU/m <sup>3</sup> )	< 10 (PFU/m <sup>3</sup> )	99.9 %

## 4. 결론

본 연구에서는 바이오에어로졸 저감을 위해 전기화학적 공정이 적용된 나노 버블



발생장치 및 이와 연계한 공기정화장치를 제작하였으며, 나노 버블의 접촉 방식, 송풍량, 나노 버블수 용량에 따른 비교시험을 통해 최적 운영조건 선정에 위한 성능평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 나노 버블 분사 방식을 통해 바이오에어로졸 접촉 시, 분사 유량이 높아질수록 저감효율이 증가함을 보였으며, 10 L/min 분사량에서 약 51%의 최대 저감 효율을 보였다.

2) 나노 버블수 내 바이오에어로졸을 직접 분사하여 기액 접촉 시, 수면이 낮고 (적은 나노 버블수 용량) 송풍량이 증가할수록 바이오에어로졸 저감 효율은 감소하는 경향을 보였다. 또한, 나노 버블수 용량이 커질수록 바이오에어로졸의 저감 효율은 증가하는 경향을 보이며, 송풍 노즐 위 수면 15 cm 이상에서는 약 90 ~ 94% 저감 효율을 보였으나, 일정 수준의 송풍량 및 수면 높이가 올라갈수록 수중 폭기에 의한 수면의 상승으로 인해 상단 나노 버블 분사 노즐이 나노 버블수에 잠기게 되어 분사에 의한 혼합 방식을 적용할 수 없었다.

3) 혼합 방식의 경우, 단독 접촉 방식들에 비해 저감 효율이 증가함을 보였으며, 특히, 2.25 m<sup>3</sup>/min 이상의 송풍량, 공급수 40 L (송풍 노즐 위 10 cm 수면 위) 이상에서 99% 이상의 저감 효율을 보였다.

4) 선행 시험을 통해 최적의 운영 조건은 혼합 접촉 방식(나노 버블 노즐 분사량 10 L/min), 송풍량 2.25 m<sup>3</sup>/min, 공급수 40 L이었으며, 30분간 챔버 시험을 통해 부유 미생물과 부유 바이러스의 저감 효율을 도출한 결과, 99.9% 이상의 효율을 보이며 본 연구에서 개발한 바이오에어로졸 저감장치의 효율적인 저감 성능을 확인하였다.

## 5. 감사의 글

본 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(21CTAP-C164305-01)의 연구과제로 수행되었음.

## References

- [1] G. Sneha, T. Ujwalkumar, Global Implications of Bio-aerosol in Pandemic, Environment Development and Sustainability, (2020), Vol.22, No.5, pp.3861-3865.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00704-2>
- [2] K. H. Kim, E. Kabir, S. A. Jahan, Airborne bioaerosols and their impact on human health, Journal of Environmental Science, (2018), Vol.67, pp.23-35  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.08.027>
- [3] Z. Xu, Y. Wu, F. Shen, Q. Chen, M. Tan, M. Yao, Bioaerosol Science, Technology, and Engineering: Past, Present, and Future, Aerosol Science and Technology, (2011), Vol.45, No.11, pp.1337-1349.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/02786826.2011.593591>
- [4] Y. S. Kim, K. Y. Kim, Characteristics and measurement methods of bio-aerosols, Air Cleaning Technology, (2007), Vol.20, No.1, pp.1-39.  
Available from: <https://koreascience.kr/article/JAKO200764064777775.page>
- [5] G. N. Bae, Indoor bio-aerosol reduction and removal technologies, Air Cleaning Technology, (2010), Vol.23, No.3, pp.10-22.  
Available from: <https://koreascience.kr/article/JAKO201072863984585.page>
- [6] K. J. Heo, H. B. Kim, B. U. Lee, Concentration of environmental fungal and bacterial bioaerosols during the monsoon season, Journal of Aerosol Science, (2014), Vol.77, pp.31-37

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.07.001>

- [7] R. H. Yoon, J. L. Yordan, Zeta-potential measurement on microbubbles generated using various surfactants, *Journal of Colloid and Interface Science*, (1986), Vol.113, No.2, pp.430-438.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(86\)90178-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(86)90178-5)
- [8] R. Cherry, C. Hulle, Cell death in the thin films of bursting bubbles, *Biotechnology progress*, (1992), Vol.8, No.1, pp.11-18.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/bp00013a003>
- [9] G. B. Miguel, J. J. Chalmers, Cell-Bubble Interactions: Mechanisms of suspended cell damage, *Annals New York Academy of Sciences*, (1992), Vol 665, No.1, pp.219-229.  
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1992.tb42586.x>
- [10] G. I. Park, H. R. Kim, I. H. Cho, Model setup and optimization of the terminal rise velocity of microbubbles using polynomial regression analysis, *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, (2018), Vol.35, No.4, pp.1393-1406.  
DOI: <https://doi.org/10.12925/jkocs.2018.35.4.1393>
- [11] S. H. Park, A review on size, shape and velocity of a bubble rising in liquid, *Particle and aerosol research*, (2017), Vol.13, No.1, pp.1-10.  
DOI: <https://doi.org/10.11629/jpaar.2017.3.31.001>
- [12] S. H. Cha, Present state and future prospect for microbubble technology, *Bulletin of Food Technology*, (2009), Vol.22, No.3, pp.544-552.  
Available from: <https://koreascience.kr/article/JAKO200975535978850.page>
- [13] I. S. Yeo, K. J. Yoo, C. G. Park, Performance Evaluation of Nano-bubble System with Electro-oxidation process for Bio-aerosol Reduction, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, (2022), Vol.23, No.8, pp.293-299.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.8.293>