

바이오에어로졸 내 미생물 저감을 위한 전기산화 나노버블 발생시스템 성능평가 연구

여인설¹, 유근제², 박찬규^{1*}

¹한국산업기술시험원 환경기술본부, ²한국해양대학교 환경공학부

Performance Evaluation of Nano-bubble System with Electro-oxidation process for Bio-aerosol Reduction

Inseol Yeo¹, Keunje Yoo², Chan-Gyu Park^{1*}

¹Division of Environmental Technology, Korea Testing Laboratory

²Department of Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University

요약 바이오에어로졸(bioaerosol)은 생물학적 인자들이 기체 환경에 미세한 입자로 분산된 상태로 실내의 대기 에어로졸에 포함되어 공기질 오염 및 전염성 질병의 확산에 영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다. 이를 효과적으로 검출하고 감소시키는 기술 개발이 필요하며, 본 연구에서는 나노기포의 잠재에너지를 활용한 바이오 에어로졸 내 미생물 저감 성능평가를 수행하여 나노기포 생성 시스템의 최적 운영 조건을 선정하는 것을 목표로 한다. 또한, 나노기포의 안정성 및 표면의 음이온 집약을 위해 전기산화환원 공정을 적용하여 나노기포 발생 시스템을 제작하였으며, 표피포도상구균의 ATP 활성도 분석을 통해 성능평가를 수행하였다. 실험은 공급수의 선정, 공급수 순환유량 20 L/min에서의 공기 주입량 및 순환 시간별 나노기포 생성에 의한 미생물 저감 평가, 전류밀도별 전기산화환원 공정 연계 성능평가로 수행하였다. 실험 결과, 공급수 종류에 관계없이 나노기포수의 미생물 저감 효과를 확인하여 수도수를 최종 공급수로 선정하였다. 공기주입량과 순환 시간별 생성된 나노기포수 성능평가 결과, 각각 80 mL/L, 5분의 조건에서 표피포도상구균이 89.5% 제거되어 가장 높은 효율을 보였으며, 전류밀도 120A/m²에서 나노기포 발생에 의한 미생물 저감 대비 약 9.7% 수준의 효율이 향상됨을 보여주었다.

Abstract Bioaerosols can remain in the air for a long time, affecting pollution and spreading infectious diseases. Therefore, it is necessary to develop a technology to detect and reduce bioaerosols effectively. This study examined the performance of using the potential energy of nano-bubbles to reduce microorganisms in bio-aerosols and select the optimal operating conditions of a nano-bubble generating system. In addition, to improve the stability and surface anion concentration of nano-bubbles, the system was fabricated by applying an electro-redox process. The experiments were derived through the ATP activity analysis of Staphylococcus epidermidis, which was performed by selecting the feed water, and evaluating the microbial removal tendencies depending on the air injection amount and circulation time at the feed water circulating flow rate of 20 L/min, and evaluating by the current densities. As a result, microbial reduction by the nano-bubble water was confirmed regardless of the type of feed water. In addition, the performance evaluation according to air injection amount and circulation time revealed 89.5% removal of Staphylococcus epidermidis under 80 mL/L and 5 minutes, respectively. At a current density of 120 A/m², the efficiency was improved by approximately 9.7% compared to the microbial reduction efficiency by nano-bubbles.

Keywords : Bioaerosol, Disinfection, Electro Oxidation, Microorganism, Nano Bubbles

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

*Corresponding Author : Chan-Gyu Park(Korea Testing Laboratory)

email: pcg6189@naver.com

Received May 30, 2022

Revised July 11, 2022

Accepted August 3, 2022

Published August 31, 2022

1. 서론

도시화 및 산업화로 인해 현대인들은 실내공간에서 거주하는 시간이 증가하고 있으며, 실외환경과 달리 밀폐된 공간에서 여러 사람과 빈번하게 접촉할 수밖에 없는 환경에 노출되어 있다.

바이오에어로졸(bioaerosol)은 크기가 약 0.02 ~ 100 μm 정도로 생물학적 인자들이 기체적 환경에 미세한 입자로 분산된 상태를 말하며, 실내에서는 대부분 작업환경, 생활환경 등의 인위적인 환경오염에 의해 전파 혹은 생성된다. 특히, 대기 중에 오래 머무를 수 있어 실내공기질을 오염시킬 뿐만 아니라 실외대기의 에어로졸에도 포함되어, 전염성 질환을 확산시킬 수 있는 매개체가 될 수 있어 국내외에서 부정적인 측면이 보고되고 있다. 특히, 감염자의 비말 접촉 등으로 인해 흡입된 바이오에어로졸이 대감염 및 대유행(pandemic)을 일으킬 수 있어, 이를 신속하게 검출하고 제어할 수 있는 기술의 필요성이 점점 증대되고 있다[1-6].

대표적인 입자상 오염물질의 제어 기술로 여과, 정전기력을 이용한 집진 기술이 있으나, 미생물 제어에 필터를 이용하는 경우, 생물학적 특성으로 인한 번식 및 잔류 서식에 의한 냄새 유발 및 재유입되는 문제로 추가 처리가 필요하며, 이를 향균하는 기술로 열에너지, 광에너지, 전기 이온, 라디칼 산화, 항균 필터 및 화학합성 소독제 등의 기술이 적용되고 있다. 다만, 반응속도, 국부적인 살균력, 높은 에너지 소모량, 인체 유해성 등의 문제가 제기되고 있으며, 이를 해결하기 위한 방안으로 나노기포를 이용한 기술이 연구되고 있다[7-9].

미세기포는 100 μm 미만의 크기를 가진 매우 작은 기포를 말하며, 기포 크기와 발생량에 따라 기능성과 활용 특성이 달라 크기에 대한 정의의 기준은 다를 수 있으나, 나노기포(초미세기포)는 1 μm 이하로 정의하고 있다. 나노기포는 크기가 작을수록 내부압력 증가와 함께 기체 용해율을 증가시키고, 비표면적의 증가로 인해 물질전달률 및 세정 효율이 증가하는 기술로, 표면의 많은 이온이 둘러싸여 기포가 안정화되고 잔류성이 높아지며, 표면전하 증가와 기체가 파열되는 순간 높은 에너지 및 라디칼이 생성되어 이러한 기포의 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, 살균설비 등 다양한 응용분야에 적용되어 연구되고 있다 [10-14].

본 연구에서는 나노기포가 갖고 있는 잠재 에너지를 활용하기 위한 나노기포 발생장치를 제작하였으며, 기포의 안정성을 향상하기 위한 표면의 음이온 집약을 위한 전기 산화환원 공정을 연계 적용하여 바이오에어로졸 내 미생물의 저감 성능평가 및 최적화 운영 조건 도출 선정을 위한 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 바이오에어로졸 내 미세입자 및 미생물의 저감을 위해 전기산화환원 공정이 적용된 나노기포 발생장치를 제작하였으며, 실험을 위한 장치의 구성은 Fig. 1에 나타내었다. 나노기포발생장치는 수도물 등 공급수를 이용하여 기체를 순간적으로 액체에 용해시켜 1 μm 이하 크기의 나노기포(초미세기포)를 생성시켜 체류할 수 있도록 하며, 나노기포의 기액 경계면에 음이온을 집약하기 위한 DSA 전극(Cathod: Ti, Anode: Ir-Ru-Ti)을 활용한 전기산화환원 공정이 포함되어 구성된다.

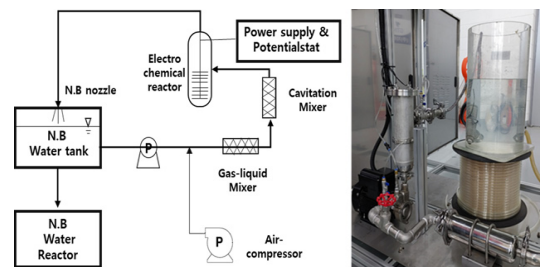


Fig. 1. Schematic diagram of bio-aerosol reduction experiment

Table 1. System specification

Spec.	Description	
Nano Bubble Pump (circulation)	20 L/min	
Nano bubble water tank (generation and circulation)	Acryl, $\phi 400 \times 500$ (mm)	
Nano bubble water reactor	Pyrex 2L glass bottle Orbital shaker 200 RPM	
Electro chemical reactor	Electrode	Cathod: Ti, Anode: Ir-Ru-Ti (mesh type)
	Reactor	50 (mm) x 50 (mm), 10 set STS 304, $\phi 100 \times 200$ (mm)

2.2 실험 재료 및 시약

본 연구에서 사용한 표피포도상구균은 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 18시간동안 정지 배양 하였다.

2.3 실험 방법

본 연구에서 개발된 나노기포발생장치의 나노기포 크기 및 밀도 분석은 나노입자 크기 및 농도시각화 측정 장비인 NS300 (Malvern, UK)장비를 사용하였다.

나노기포수를 이용한 표피포도상구균 제거 성능 평가를 위해 공급수는 증류수, 수도수를 이용하였다. 나노기포발생장치의 최적운영 선정을 위해 공급수 순환유량은 20 L/min으로 고정하여 운영하였으며, 공기주입량(80, 120, 160 mL/min)과 농축 체류 시간(5, 10 분)을 달리 하여 나노기포수를 생산한 후, 각각의 나노기포수 2 L에 표피포도상구균을 20 mL 주입하여 시간에 따른 ATP 활성화도를 분석하였다. 또한, 최적의 공기주입량 및 농축 체류시간을 선정한 조건에서 전기산화환원 공정 연계 평가를 위해 전류 밀도(0, 40, 80, 120, 160 A/m²)를 달리하여 시험을 수행하였다.

표피포도상구균의 ATP 활성화도는 SystemSURE II (Hygiena, USA) 장비를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 나노기포 특성 평가

제작한 나노기포 생성장치를 통해 생성된 나노기포의 유무 확인을 위해 레이저의 산란 육안 분석을 실시하였으며(Fig. 2), 나노기포의 평균 크기와 밀도 측정을 위해 20 L의 증류수를 공기주입량 80 mL/min, 20 L/min의 유량으로 5분 간 순환 하여 분석한 결과, 평균 크기분포 125.3 ± 77.1 nm, 밀도 1.63 x 10⁸ particles/mL 로 나타났다(Fig. 3).

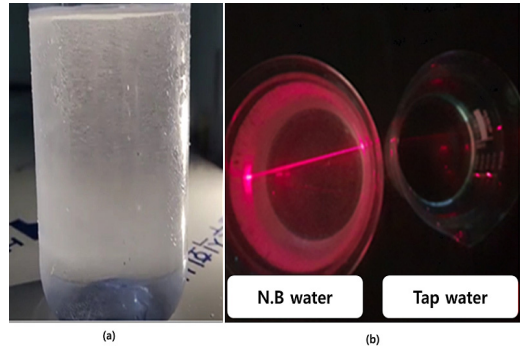


Fig. 2. Characteristics and presence of nano-bubbles (a) generated nano-bubbles (b) laser scattering experiments

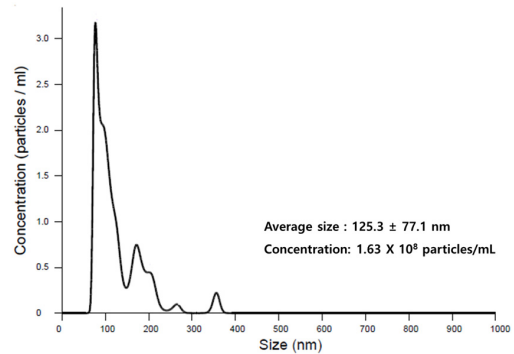


Fig. 3. Characteristics N.B average size and concentrations

3.2 나노기포 생성 공급수 선정 및 저감 가능성 평가

최적의 공급수의 선정을 위해 증류수와 수도수를 이용한 비교실험을 수행하였으며, 나노기포수의 미생물 저감 가능성을 검토하였다. 각각의 공급수에는 표피포도상구균 배양액을 주입한 후, 20분 간 시간에 따른 ATP 변화값을 확인하였다(Fig. 4).

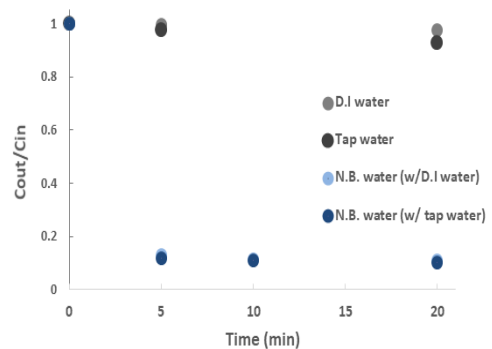


Fig. 4. Comparison result of removal tendency according to types of supply water

증류수에서는 ATP 활성화도가 2.5% 감소하였고, 수도수는 7.4% 감소되는 경향을 보였으며, 증류수와 수도수로 생산한 나노기포수를 이용해 표피포도상구균의 저감효율 분석 결과, 증류수에서는 88.9%, 수도수에서는 89.5% 수준의 제거효율을 보여주며 미생물 저감효과 및 효율이 높아짐을 확인하였다. 최종적으로 공급수의 공급 편의성을 고려하여 수도수를 최종 선정하여 실험을 수행하였다.

3.3 나노기포 발생장치 운영 최적화 성능평가

나노기포 발생 최적화 운영을 위한 공기주입량 선정 실험은 50 L의 수도수를 20 L/min의 유량(1cycle, 2.5 분)으로 고정하여 순환시켰으며, 공기 주입량을 80, 120, 160 mL/min, 기포 순환시간을 5, 10 분으로 설정하여 나노기포수를 생산하였다.

생산된 나노기포수에 표피포도상구균 배양액을 주입한 후, 시간에 따른 ATP 활성화도 변화를 확인한 결과, 공기 주입량 80 mL/min, 순환시간 5 분에서 89.5%로 가장 높은 효율을 나타내며, 공기주입량과 운전시간 증가에 따른 제거효율의 영향은 없는 것으로 나타났다(Fig. 5, 6).

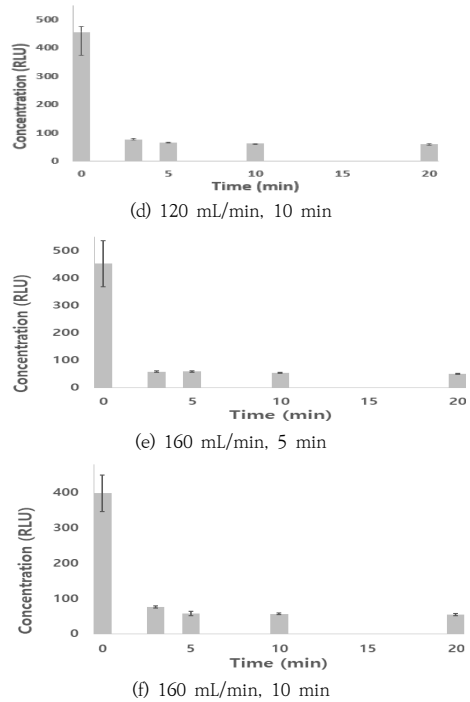
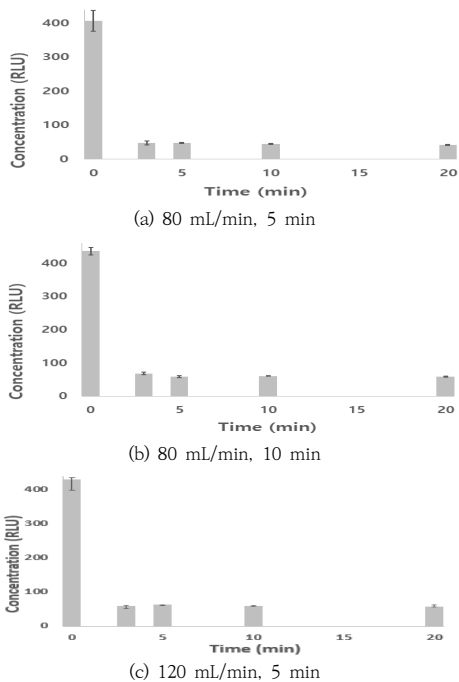


Fig. 5. Concentrations change and removal tendencies depending on air injection amount and circulation time

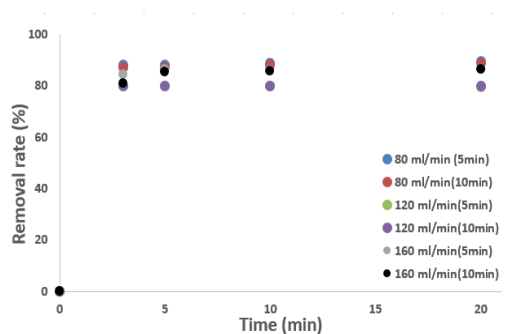


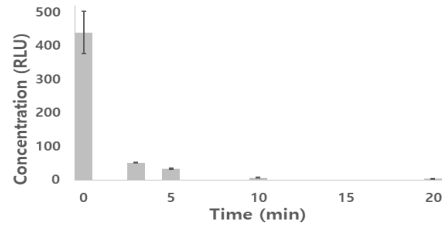
Fig. 6. Removal tendencies depending on air injection amount and circulation time

기포의 크기 및 종말부상속도의 관점에서 공기주입량, 운전시간이 증가할수록 기포의 부상속도가 감소되나 공기량과 운전시간 사이의 상관관계는 적은 것으로 보고되고 있으며[15], 낮은 부상속도(높은 체류시간)를 갖는 미세기포가 입자성 오염물질의 제거 효율을 증가시키는 것과는 다르게 미생물의 사멸에는 영향이 없는 것으로 사료된다[16].

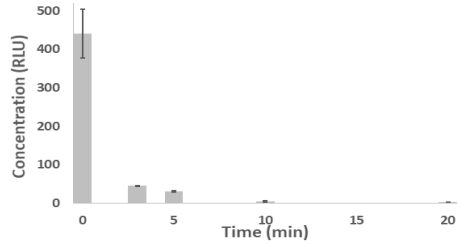
3.4 전기산화환원공정 효율성 평가

선행 실험을 통해 수도수에 공기주입량을 80 mL/min, 순환 시간을 5분으로 선정하였으며, DSA 전극의 전류밀도(0, 40, 80, 120, 160 A/m²)에 따른 표피포도상구균의 ATP 활성화도 변화를 확인하였다.

생산된 나노기포수 2 L에 표피포도상구균 20 mL를 접종한 후, 전류 밀도별 비교 실험을 실시한 결과(Fig. 7, 8), 전류 밀도가 증가해도 초기 반응속도의 차이는 미비하나, 총 제거효율이 증가하는 경향을 보였고, 120, 160 A/m² 로 전류밀도를 증가시킬 때, 최대 제거효율은 약 0.1% 증가함을 보였다. 따라서, 소모 전력량 등을 고려하여 최적의 전류밀도는 120 A/m²으로 선정하였으며, 해당 조건에서 최대 99.2% 제거효율을 보여 나노기포에 의한 제거 대비 효율이 약 9.7% 향상되었다. 이는 나노기포 표면의 집약된 음이온 전하로 인한 미생물의 활성력 상실 메커니즘에 의한 영향으로 사료된다[17].

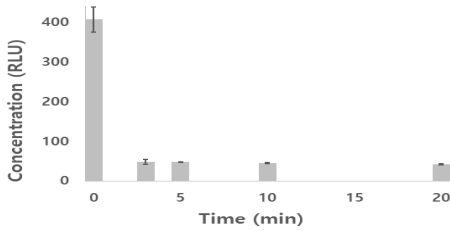


(d) 120 A/m²

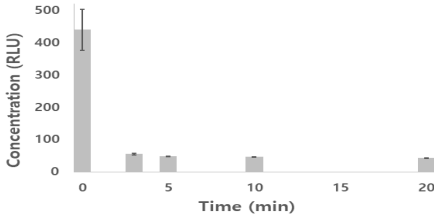


(e) 160 A/m²

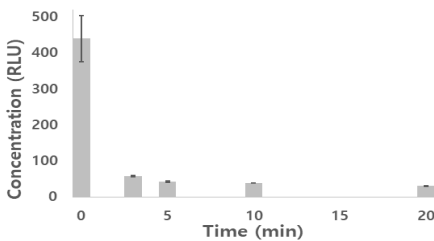
Fig. 7. Concentrations and removal tendencies depending on current density with air injection amount (80 ml/min) and circulation time(5 min)



(a) 0 A/m²



(b) 40 A/m²



(c) 80 A/m²

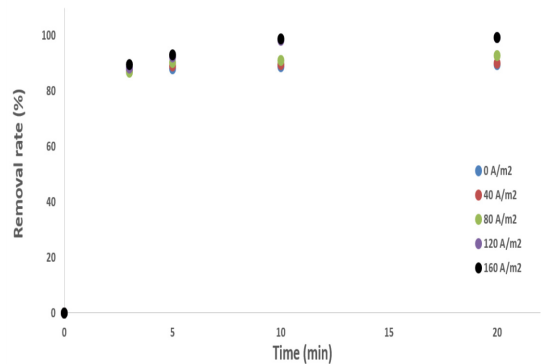


Fig. 8. Removal tendencies depending on current density

4. 결론

본 연구에서는 바이오에어로졸 내 미생물의 저감을 위해 전기산화환원 공정이 적용된 나노기포발생장치를 제작하였으며, 이의 최적운영 선정을 위한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공급수(증류수, 수도수)에 따른 표피포도상구균 농도 변화를 비교 분석한 결과, 공급수 종류에 관계 없이 나노기포수의 미생물 저감 효과가 있음을 보였고, 공급수 수급의 용이성을 고려하여 수도수를

최종 공급수로 결정하였다.

- 2) 본 연구에서 나노기포 생성을 위해 개발한 기액 믹서 및 와류 충돌 믹서, 전기산화환원조 내 공급수 순환 유량을 20 L/min으로 고정하여 순환시키며, 공기주입량 및 순환시간에 따른 최적운영 조건 선정을 위한 실험을 실시한 결과, 공기주입량 80 mL/min, 순환시간 5분의 조건에서 최대 89.5% 저감 효율을 보이며, 가장 높은 효율을 나타냈다.
- 3) DSA 전극을 활용한 전기산화환원공정의 미생물 저감 성능평가를 수행한 결과, 전류밀도가 높을수록 효율이 증가하는 경향을 보였으나, 전류밀도 120 A/m² 에서 약 99.2%의 제거효율을 보여 소모 전력량 등을 고려하여 최적의 전류밀도 조건으로 선정하였다. 이는 나노기포 발생에 의한 미생물 저감보다 약 9.7% 수준의 효율이 향상됨을 보여준다.

References

- [1] G. Sneha, T. Ujwalkumar, "Global implications of bio-aerosol in pandemic", *Environment, Development and Sustainability*, Vol. 22, No. 5, pp.3861-3865, 2020.
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*, Vol. 67, pp.23-35, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.08.027>
- [3] C. Humbal, S. Gautam, S. K. Joshi, M. S. Rajput, , "Spatial variation of airborne allergenic fungal spores in the ambient PM2.5-A study in Rajkot City, Western Part of India", *Measurement, Analysis and Remediation of Environmental Pollutants*, pp.199-209, 2020.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0540-9_10
- [4] C. A. Robbins, L. J. Swenson, M. L. Nealley, R. E. Gots, B. J. Kelman, "Health Effects of Mycotoxins in Indoor Air: A Critical Review", *Applied Occupational Environmental Hygiene*, Vol. 15, No. 10, pp.773-784, 2000.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10473220050129419>
- [5] F. Fung, W. G. Hughson, "Health Effects of Indoor Fungal Bioaerosol Exposure", *Applied Occupational Environmental Hygiene*, Vol. 18, No. 7, pp.535-544, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10473220301451>
- [6] X. Zhenqiang, et al., "Bioaerosol Science, Technology, and Engineering: Past, Present, and Future", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 45, No. 11, pp.1337-1349, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02786826.2011.593591>
- [7] Y. S. Kim, K. Y. Kim, "Characteristics and measurement methods of bio-aerosols", *Air Cleaning Technology*, Vol. 20, No. 1, pp.1-39, 2007.
- [8] G. N. Bae, "Indoor bio-aerosol reduction and removal technologies", *Air Cleaning Technology*, 23(3), pp. 10-22, 2010.
- [9] K. J. Heo, H. B. Kim, B. U. Lee, "Concentration of environmental fungal and bacterial bioaerosols during the monsoon season", *Journal of Aerosol Science*, 77, pp. 31-37, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.07.001>
- [10] R. H. Yoon, J. L. Yordan, "Zeta-potential measurement on microbubbles generated using various surfactants", *Colloid and interface science*, Vol. 113, No. 2, pp.430-438, 1986.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(86\)90178-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(86)90178-5)
- [11] S. Goldblum, Y. Bae, W. F. Hink, J. Chalmers, "Protective effect of methylcellulose and other polymers on insect cells subjected to laminar shear stress", *Biotechnology progress*, Vol. 6, No. 5, pp.383-390, 1990.
DOI: <https://doi.org/10.1021/bp00005a011>
- [12] P. B. Bradley, A. H. Robert, L. Ritva, J. P. Seth, R. W. Keith, "Defining the unknowns of sonoluminescence", *Physics Report*, Vol. 281, No. 2, pp.65-143, 1977.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(96\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(96)00050-6)
- [13] R. Cherry, C. Hulle, "Cell death in the thin films of bursting bubbles" *Biotechnology progress*, Vol. 8, No. 1, pp.11-18, 1992.
DOI: <https://doi.org/10.1021/bp00013a003>
- [14] G. B. Miguel, J. J. Chalmers(1992), "Cell-Bubble Interactions: Mechanisms of suspended cell damage", *Annals New York Academy of Sciences*, Vol 665, No. 1, pp.219-229, 1992.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1992.tb42586.x>
- [15] 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 Oil & Applied Science*, Vol. 35, No. 4, pp.1393-1406, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.12925/jkocs.2018.35.4.1393>
- [16] S. H. Park, "A review on size, shape and velocity of a bubble rising in liquid", *Particle and aerosol research*, Vol. 13, No. 1, pp.1-10, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.11629/jpaar.2017.3.31.001>
- [17] S. H. Cha, "Present state and future prospect for microbubble technology", *Bulletin of Food Technology*, Vol. 22, No. 3, pp. 544-552, 2009.

여 인 설(Inseol Yeo)

[정회원]



- 2014년 2월 : 광주과학기술원
환경공학부 (석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 연세대학교
건설환경공학부 (박사과정 재학 중)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 한국산업기
술시험원 환경기술본부 주임연구원

<관심분야>
환경공학

유 근 제(Keunje Yoo)

[정회원]



- 2015년 8월 : 연세대학교 토목환
경공학과 (박사)
- 2015년 8월 ~ 2017년 9월 : 한국
환경연구원 부연구위원
- 2017년 10월 ~ 2019년 8월 :
Columbia University Post-Doc.
- 2019년 9월 ~ 현재 : 한국해양대
학교 환경공학과 조교수

<관심분야>
환경공학

박 찬 규(Chan-Gyu Park)

[정회원]



- 2009년 1월 ~ 2009년 12월 :
국립환경과학원 전문위원
- 2010년 2월 : 연세대학교 토목환
경공학과 (박사)
- 2010년 1월 ~ 2010년 10월 :
한국과학기술연구원 Post-Doc.
- 2010년 11월 ~ 현재 : 한국산업기
술시험원 환경기술본부 책임연구원

<관심분야>
환경공학