

# 유전체 장벽방전 플라즈마 방전시간에 따른 오존 발생 농도변화의 값을 통한 실내 공간 내 부유세균 살균성능에 대한 실험

## Experiment on the Sterilization Performance of Airborne Bacteria in Indoor Spaces using the Variation of Ozone Concentration Generated According to the Discharge Time of a Plasma Module with a Dielectric Barrier Discharge Technology

이수연<sup>1</sup> · 김창수<sup>2\*</sup> · 김규리<sup>3</sup> · 임종연<sup>4</sup>

Su Yeon Lee<sup>1</sup>, Chang Soo Kim<sup>2\*</sup>, Gyu Ri Kim<sup>3</sup>, Jong Eon Im<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CEO, JRTech Co., Ltd, Ulsan, Republic of Korea

<sup>2</sup>Professor, Division of Computer Engineering and AI, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

<sup>3</sup>Assistant Research Engineer, Research and Development Department, JRTech Co.,Ltd, Ulsan, Republic of Korea

<sup>4</sup>Senior Research Engineer, Strategic Planning Department, JRTech Co.,Ltd, Ulsan, Republic of Korea

\*Corresponding author: Chang Soo Kim, cskim@pknu.ac.kr

### ABSTRACT

**Purpose:** This study aimed to evaluate the effectiveness of a dielectric barrier discharge (DBD) plasma module for sterilizing airborne bacteria in indoor spaces and measure the concentration of ozone generated during plasma discharge. **Method:** The DBD plasma module was installed in a 76m<sup>3</sup> space, and air samples were collected under various discharge times to compare the reduction of airborne bacteria. **Result:** The results showed a significant decrease in airborne bacteria, ranging from 92.057% to 99.999%, with an average ozone concentration of 0.04 ppm, below the reference value. **Conclusion:** The study suggests that plasma discharge can be used as a means of preventing the spread of airborne bacteria and viruses, while ensuring safety for human exposure.

**Keywords:** Plasma, DBD Plasma, Dielectric Barrier Discharge, Airborne Bacteria, Ozone, Sterilization, Air sterilizer, Prevention of Spread of Infectious Disease

### 요약

**연구목적:** 본 연구는 미생물의 비열 멸균 기술로서 실내 공간 내 유전체 장벽 방전 플라즈마 모듈의 방전시간에 따른 오존 발생 농도변화의 값을 통한 실내 공간 내 부유세균 살균 성능을 분석하였다. **연구방법:** 76m<sup>3</sup>체적 공간의 공조장치의 공기배출 부분에 DBD 플라즈마 모듈을 설치하고 2m 떨어진 거리에서 DBD 플라즈마 처리 시간에 따라 공기 시료를 포집하여 미처리 대조군과 비교하여 부유세균 저감 효과를 분석하였다. 또한 DBD 플라즈마 방전에 따른 오존발생농도를 확인하였다. **연구결과:** 대조군의 총 세균수는 1.83~2.00 logCFU/m<sup>3</sup>의 결과가 나왔으며, 시험군이 대조군에 비해 실내공기 중 부유세균의 최소 92.057%에서 최대 99.999%의 저감 효과를 보였다. 또한 평균 오존발생농도 0.04ppm으로 오존 발생농도 기준인 0.05ppm보다 낮은 결과를 확인하였다. **결론:** 인체에 무해한 오존량과 DBD방전 플라즈마량을 조절함으로써 공기 중 부유세균, 바이러스등의 감염병 전파 방지의 수단으로 플라즈마 방전을 사용함에 기준이 될 것으로 사료된다.

**핵심용어:** 플라즈마, 유전체장벽방전플라즈마, 부유세균, 오존, 살균, 공기 살균기, 감염병 확산 방지

Received | 9 May, 2023

Revised | 22 June, 2023

Accepted | 22 June, 2023

 OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 서론

최근 전 세계적으로 고위험 고치사율의 전파력이 강한 사스(SARS, 중증급성호흡기증후군), 신종플루, 메르스(MERS, 중동호흡기증후군) 비롯해 코로나바이러스감염증(COVID-19)과 같은 호흡기 감염병으로 인하여 정상적인 사회 기능이 마비되고 막대한 사회적, 경제적, 인적 피해가 발생하고 있다(Jung et al., 2023). 위와 같은 호흡기 감염병은 주로 사람들이 밀집하거나 환기가 잘되지 않는 밀폐 공간인 실내에서 전파율이 높으므로 실내 공간 내에서 감염원인 바이러스, 진균, 박테리아 같은 미생물에 대한 확산을 사전에 차단하여 예방하는 것이 중요하다.

실내공기 중 감염원인 부유세균은 대표적인 생물학적 유해인자로서 건강상 위해를 초래하며, 실내공기오염을 유발한다. 이를 국내 공기질 관련 규정인 「다중이용시설등의 실내공기질관리법」에서는 총 부유세균을 의료기관, 보육시설, 노인복지시설, 산후 조리원등 민감시설군에 대해 유지기준 800 CFU/m<sup>3</sup>이하로 규정하고 있다. 실내공기 중 부유세균 저감을 위한 대표적 방법으로는 자연 환기 또는 공간 내에서 상시 가동을 통한 환기 설비의 운용으로 실내 공간 내 오염된 공기를 배출하고 오염되지 않은 청정 공기를 공급하는 방법과 공기청정기 및 공기살균기등의 청정장치를 운용하여 실내공기 중 감염원을 직접적으로 저감시키는 방법이 있다. 청정장치 경우, 최근 광촉매(Photocatalyst), 자외선(UV), 이온나이저(Ionizer) 및 플라즈마(Plasma) 등이 방역 기술로서 조명 받고 있다.

플라즈마는 제4의 물질이라고도 지칭하며 기체보다 높은 에너지를 가질 때 전자와 이온으로 분리되면서 에너지가 평행을 이루는 상태를 말하며, ·OH, ·H, ·O, ·O<sub>2</sub>·, ·HO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 등과 같은 라디칼 및 화학적 활성종들이 생성되며 미생물의 세포벽이나 세포막을 통해 확산되면서 주요 구성 성분인 다당류, 지질, 단백질 그리고 세포 내의 DNA와 같은 거대 분자들과 반응하여 구조를 변화시켜 세포를 손상시키는 것으로 보고되었다(Kim et al., 2018).

본 연구는 미생물의 비열 멸균 기술로서 유전체장벽방전(dielectric barrier discharge, DBD) 플라즈마 모듈 적용에 따른 오존 발생 농도변화의 값을 통한 실내 공간 내 부유세균 살균 성능에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

## 연구방법

### 유전체장벽방전 플라즈마 장치

대기압플라즈마(atmospheric pressure plasma)에서 이용되는 방전방식으로는 코로나 방전, 유전체방전, 및 스파크 방전 등이 있다. 이중 유전체 장벽 방전(Dielectric Barrier Discharge, DBD)이란 대기압 하에서 급격하고 불안정한 방전의 발생을 억제하면서 플라즈마를 비교적 안정적으로 생성하는 방식으로 유전체를 사이에 두고 두 개의 평행한 전극 사이에서 방전되는 플라즈마를 의미 한다.

본 연구에서 유연한 코일스프링 형상의 외부전극을 갖는 전극부 및 이를 구비한 유전체장벽방전(dielectric barrier discharge, DBD) 플라즈마 발생장치인 LOHP-P01 모듈(Jeongrok Co., Ltd., Ulsan, Korea)을 사용하였다. LOHP-P01 모듈은 Fig. 1과 같이 외부전극을 코일스프링 형상으로 형성하고, 내부전극을 감싸고 있는 유연피복층과 외부전극 사이에 소정의 거리를 가지도록 이격함으로써, 길이방향의 전극부 전체에 균일한 플라즈마 방전을 발생시킬 수 있다. 전원부의 출력전압은 2500V 이상이며, 출력주파수는 50kHz 이상을 가진다.

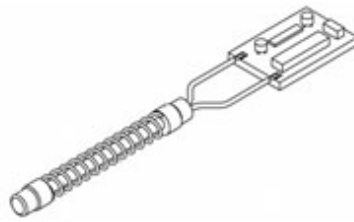


Fig. 1. An external electrode portion and a drawing of a plasma generating apparatus including the same

### 시료의 채취 및 세균 수 측정

총 부유세균의 측정은 공기시료를 일정량 흡입하여 배지에 충돌시켜 공기 중의 부유세균을 포집하는 충돌법을 이용하였다. Fig. 2와 같이 76m<sup>3</sup>체적 공간의 공조장치(난방 및 냉방 장치)의 공기배출 부분에 DBD 플라즈마 발생장치를 설치하고 공중 부유 미생물 측정을 위해 2m 떨어진 거리에 부유세균 포집기(KAS-110, KEMIK)를 위치한다. DBD 플라즈마 발생장치를 설치 후 DBD 플라즈마 처리를 1시간동안 1차 4분~8분 및 25분, 1차 결과를 바탕으로 세부 설정에 따른 2차 7분30초, 7분15초, 5분30초, 5분15초, 3분 및 2분30초의 간헐적 플라즈마 방전 시간에 따라 적용하였다.

사용 배지는 표준한천배지(Plate Count Agar, KisanBio)로 페트리디시(Petri dish)에 조제 후 부유세균 포집기 내에 삽입하여 공기 중의 부유세균이 부착될 수 있도록 한다. 공기시료는 25L/min의 유량으로 10분간 포집하여 총 250L의 공기를 채취하였다. 이를 35±1°C에서 48±1시간의 조건에서 배양하여 플라즈마 처리된 부유세균이 배지에서 자라 형성하는 집락(colony) 수를 세어 미설치 대조군과 비교하여 부유세균 저감 효과를 분석하였다. 이때 단위로 CFU(colony forming unit)를 사용하였으며, 같은 DBD 플라즈마 방출 조건으로 최소 3회 이상 반복하였다.



Fig. 2. Placement of LOHP Module and Floating Bacteria Collector

### Ozone (O<sub>3</sub>) 농도 측정

SPS-KOA AS 01-1889 공기살균기(한국자외선오존협회)규격에 준하도록 30m<sup>3</sup>이상의 76m<sup>3</sup>공간에서 공조장치(난방 및 냉방 장치)의 공기방출부분에 LOHP-P01 모듈을 설치하고 시료와 0.5m 떨어진 지점에 오존측정기를 설치하여 행하였다. 오존측정기

는 오존발생농도를 기록 및 연속측정 가능하며, 오존발생농도 기록은 분당 1회로 하며, 기록의 채택은 가동 2분후 기록부터 한다.

또한 공기유입에 따라 오존발생농도 측정결과가 정확하지 않을 수 있어 오존농도 측정 시 사람의 출입을 삼가한다. LOHP-P01 모듈을 가동하고 오존측정기가 설치된 곳에서 흡입유량을 약 1L/min으로 하여 1시간 동안 오존발생농도를 측정한다.

## 연구결과

### 실내 공기 내 부유세균 저감효과

DBD 플라즈마 처리시간에 따른 실내 공기 내 부유세균 저감 효과는 log reduction (LR)은  $\log(A) - \log(B)$ 에 따라 계산하였다. A는 대조군 생균수의 로그값, B는 시험군 생균수의 로그값으로 Log 값은 소수점 셋째 자리까지 표기하였다.

본 연구에서 대조군 총 부유세균은  $1.83 \sim 2.00 \log \text{CFU}/\text{m}^3$ 이며, 실내 공간에 대해 상시 공조시스템, 환기 및 매일 1회 청소를 진행하는 관계로  $2.00 \log \text{CFU}/\text{m}^3$ 이하의 결과가 나왔다. Fig. 3, Table 1에 따르면 DBD 플라즈마 미처리 대조군(Control)에 비해 시험군에서 최소 92.057%에서 최대 99.999%의 실내공기 중 부유세균 저감 효과를 보였으며, 1시간동안 간헐적 DBD 플라즈마 처리 시간에 따라 실내 공기 중 부유세균 평균 저감율은 1차 4분~8분 및 25분 시험군 각각 99.999%, 94.846%, 92.057%, 98.550%, 99.999% 및 99.814%로 유의적으로 나타났다. 오존발생농도와 상관관계를 고려하여 설정한 2차 7분30초/2분30초, 7분15초/2분45초, 5분30초/4분30초, 5분15초/4분45초, 2분30초/2분30초(Discharge/Stop) 시험군에서의 평균 공기 중 부유세균 저감율은 98.666%, 96.912%, 99.999%, 98.666% 및 99.999%으로 1차 시험군 보다 높은 저감율의 결과를 보였다. 또한 4분/1분, 8분/2분, 5분30초/4분30초 및 2분30초/2분30초 DBD 플라즈마 처리한 시험군에서 99.999%의 가장 높은 저감 효과를 확인하였다. 위의 결과에서 보듯 DBD 플라즈마에 노출되는 시간이 증가할수록 공기 중 부유세균 저감율이 비례하여 증가함을 확인 할 수 있었으나, 같은 DBD 플라즈마 처리 시간이라도 5분/5분 시험군과 2분30초/2분30초 시험군과 같이 간헐적 방전시간을 나눠 처리하는 것이 저감 효과가 높은 결과가 나타났다.

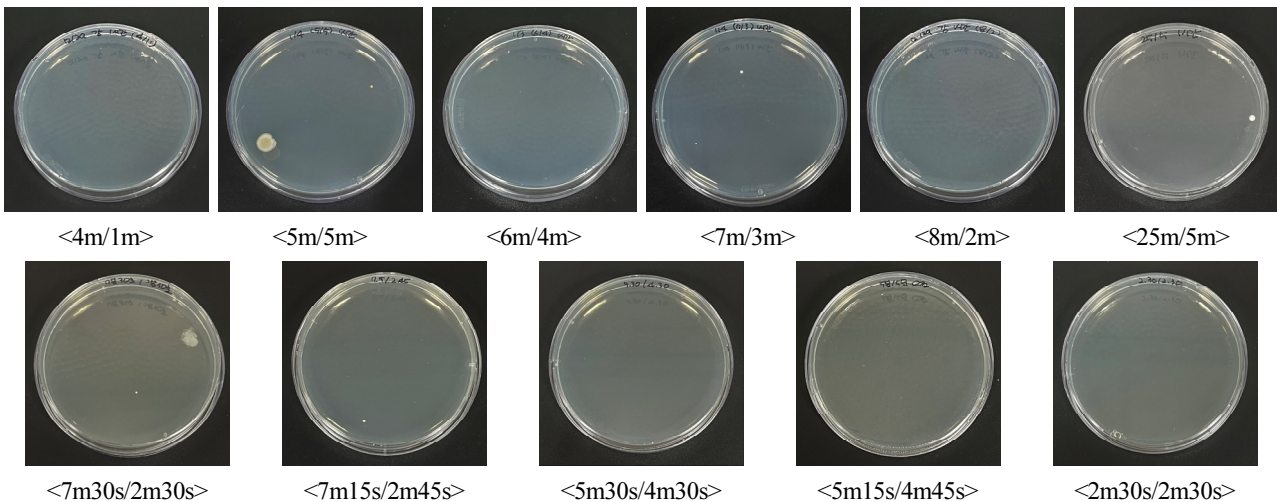


Fig. 3. Results of incubation of DBD plasma-treated suspended bacteria

**Table 1.** Effect of DBD plasma treatment on the reduction of floating bacteria

	Time (Discharge/Stop)	Number of bacteria per unit area (log CFU/m <sup>3</sup> )			log reduction (% reudction)			Average (%)
		tester 1	tester 2	tester 3	tester 1	tester 2	tester 3	
1st	Control	1.86	1.96	1.83	-	-	-	-
	4min/1min	<0	<0	<0	1.86(99.999%)	1.96(99.999%)	1.83(99.999%)	99.999
	5min/5min	0.90	0.60	<0	0.96(88.888%)	1.36(95.652%)	1.83(99.999%)	94.846
	6min/4min	0.60	1.20	0.60	1.26(99.444%)	0.76(82.609%)	1.23(94.118%)	92.057
	7min/3min	0.90	0.60	<0	0.96(88.888%)	1.36(95.652%)	1.83(99.999%)	98.550
	8min/2min	<0	<0	<0	1.86(99.999%)	1.96(99.999%)	1.83(99.999%)	99.999
	25min/5min	0.60	<0	<0	1.26(99.444%)	1.96(99.999%)	1.83(99.999%)	99.814
	Control	1.83	1.88	2.00	-	-	-	-
2st	7m30s/2m30s	<0	<0	0.60	1.83(99.999%)	1.88(99.999%)	1.40(96.000%)	98.666
	7m15s/2m45s	<0	0.60	0.60	1.83(99.999%)	1.28(94.737%)	1.40(96.000%)	96.912
	5m30s/4m30s	<0	<0	<0	1.83(99.999%)	1.88(99.999%)	2.00(99.999%)	99.999
	5m15s/4m45s	<0	<0	0.60	1.83(99.999%)	1.88(99.999%)	1.40(96.000%)	98.666
	2m30s/2m30s	<0	<0	<0	1.83(99.999%)	1.88(99.999%)	2.00(99.999%)	99.999

**오존발생농도분석**

간헐적 DBD 플라즈마 처리시간에 따른 오존발생농도 결과를 Table 2에 나타냈다. 1시간 동안 기록된 오존발생농도의 평균 및 최댓값, 최솟값을 구하여 그 단계의 오존발생농도 값으로 한다. ppm 값은 소수점 셋째 자리까지 표기하였다. 같은 오존 발생농도 측정 조건으로 최소 3회 이상 반복하였으나, 측정 농도 차이가 크지 않아 산술평균으로 평가하였다.

본 연구에서 평균 오존 발생 농도는 최소 0.024ppm, 최대 0.06ppm로 나타났으며, 1차 4분~8분 조건에서 SPS-KOA AS

**Table 2.** Ozone generation concentration according to DBD plasma module application

Measur ement time	Time (Discharge/Stop)	Average ozone generation concentration (ppm)	Maximum value (ppm)	Minimum value (ppm)
1st	4min/1min	0.045	0.039	0.028
	5min/5min	0.024	0.032	0.003
	6min/4min	0.042	0.065	0.02
	7min/3min	0.028	0.038	0.01
	8min/2min	0.033	0.047	0.019
	25min/5min	0.06	0.078	0.007
1h	7m30s/2m30s	0.041	0.063	0.016
	7m15s/2m45s	0.048	0.074	0.015
	5m30s/4m30s	0.043	0.068	0.014
	5m15s/4m45s	0.045	0.069	0.017
	2m30s/2m30s	0.029	0.043	0.006

01-1889(공기살균기, 한국오존자외선협회) 및 KS C 9314:2019(공기청정기, 산업표준심의회) 의 오존발생농도 기준인 0.05ppm 보다 낮은 결과를 확인했으나, 1차 25분 DBD 플라즈마 처리 조건에서 0.06ppm으로 기준치 보다 수치를 보였다. 1차 오존발생농도 결과를 바탕으로 평균 오존발생농도가 기준에 부합하며, 비교적 낮은 5분, 7분을 기준으로 DBD 플라즈마 방출시간 및 정지시간을 상세 설정하여 2차로 진행하였다. 2차 7분30초/2분30초, 7분15초/2분45초, 5분30초/4분30초, 5분15초/4분45초 및 2분30초/2분30초 시험군에서 오존발생농도 기준에 준하는 결과가 나타났으며, Fig. 4와 같이 DBD 플라즈마 방출 시간이 길어짐에 따라 비례하여 오존발출농도가 증가함을 확인하였다. 결과에서 보듯 1차 5분, 7분/3분 시험군 및 2차 2분30초/2분30초 시험군에서 0.024~0.029ppm으로 낮은 오존발생농도를 유지하였다.

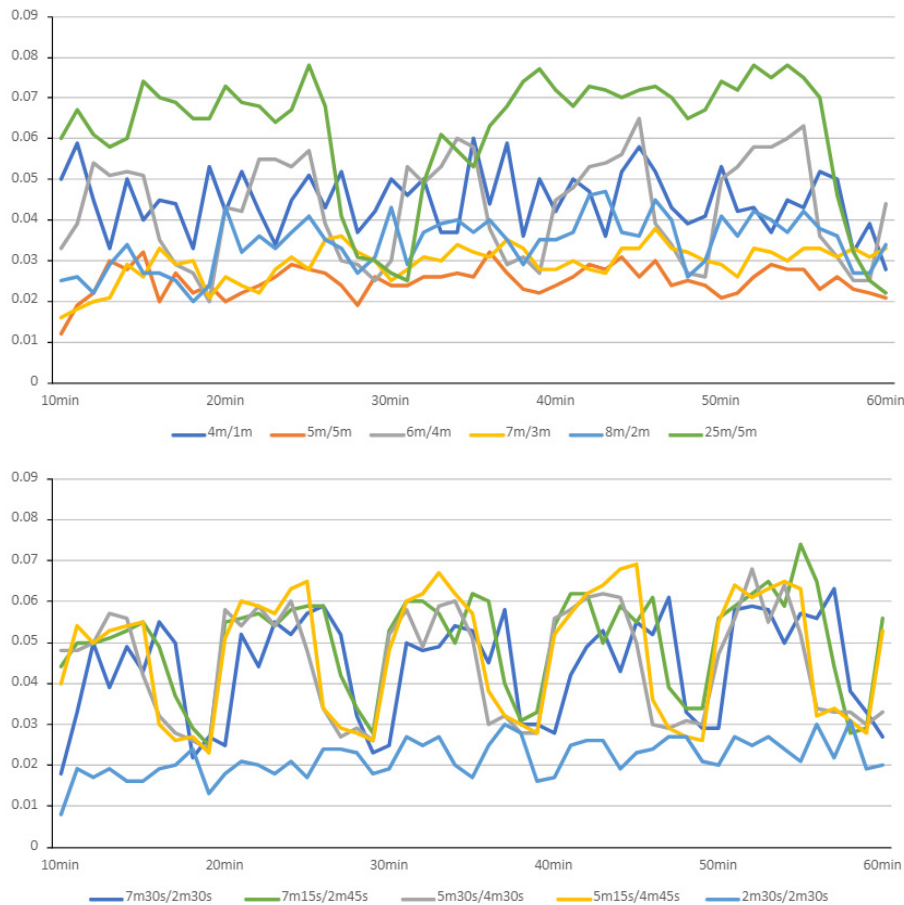


Fig. 4. Ozone generation concentration graph according to DBD plasma module application

## 결론

세계적으로 감염병에 대한 관심이 고조되면서 감염원인 미생물 살균 및 저감에 대한 대책이 요구되고 있다. 이에 따라 본 연구에서 실내 공간 내 유전체 장벽 방전 플라즈마 모듈의 방전시간에 따른 오존 발생 농도변화의 값을 통한 공기 중 부유세균 저감 성능에 대해 분석하였다.

DBD 플라즈마 모듈을 이용하여 실내 공기 중 부유세균 저감 효과를 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 플라즈마를 처리하지 않는 대조군과 비교하여 DBD 플라즈마 처리 시간에 따라 형성된 부유세균 집락 수를 계수하여 확인한 결과 플라즈마 방전 시간이 길어질수록 집락 수가 감소함을 확인하였다. 이와 같이 부유세균 저감 효과가 극대화시키는 결과를 얻고자 방전 시간을 늘리는 방법은 부유세균의 저감율에는 좋을 수 있으나, 같은 DBD 플라즈마 처리 시간이라도 간헐적으로 방전 시간을 나눠 처리하는 것이 저감 효과가 높은 결과가 나타났다. 오존발생농도 또한 DBD 플라즈마 방전시간에 비례하여 오존발생농도 기준치인 0.05ppm을 초과시키는 결과를 야기하므로 DBD 플라즈마 방전을 간헐적으로 나눠 처리할 경우 이러한 문제를 방지하는 결과를 확인하였다.

부유세균 저감율로는 최소 92.057%, 최대 99.999%으로 4분/1분, 8분/2분, 5분30초/4분30초 및 2분30초/2분30초 시험군에서 99.999% 저감효과를 확인했으며, 평균 오존발생농도 최소 0.024ppm, 최대 0.06ppm으로 5분/5분, 7분/3분 및 2분30초/2분30초 시험군에서 오존발생농도 기준 보다 낮은 0.024~0.029ppm의 결과를 얻었다. 이를 통합한 결과 2분30초/2분30초 시험군일 때 높은 실내공기 중 부유세균 저감 효과와 낮은 오존발생농도로 가장 효과적인 조건으로 이는 인체에 무해한 오존량을 조절함으로써 공기 중 부유세균, 바이러스 등의 감염병 전파 방지의 수단으로 플라즈마 방전을 사용함에 기준이 될 것으로 사료된다.

본 연구 자료를 바탕으로 공기 유입과 체적, 유동인구가 많거나 불특정 다수 실내공간에서의 DBD 플라즈마 방전 시간에 따른 오존수치 안정화 및 부유세균 저감 효과가 다름에 따라 이를 알아보기 위한 후속 연구가 진행되어야 할 것이다.

## Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 민군협력진흥원의 지원을 받아 2022년부터 2024년까지 수행하는 국방기술상용화지원사업(과제번호 22-DC-CH-13)으로 “복합방전 플라즈마를 통한 지능형 수산화이온 살균기 부품 개발”의 일부 내용이며, 이에 감사를 드립니다.

## References

- [1] Bae, E.K. (2018). The Effects of Argon Dielectric Barrier Discharge Plasma on Bacterial Growth. Master's Thesis, Catholic University of Pusan.
- [2] Central Disease Control Headquarters (2023). Detailed Rules of Living Quarantine Guide. (7th ed), Korea Centers for Disease Control and Prevention, Cheongju.
- [3] Cho, J.K. (2020). “Suspected cases of COVID-19 air transmission and Building Air Conditioning and Ventilation Methods.” Air Cleaning Technology, Vol. 33, No. 4, pp. 9-16.
- [4] Han, G.S. (2022). “Plasma sterilization technology, you need to know to use it properly.” ETNEWS, 2022.11.27., <https://www.etnews.com/20221123000068>
- [5] Jang, D.J. (2020). “It fell 6.5 meters, stayed for 5 minutes, and got infected...‘It's possible to get long-distance droplet infections indoors.’” SEDAILY, 2020.12.01., <https://www.sedaily.com/NewsView/1ZBIJUO4V8>
- [6] Jung, J.Y., Kim, Y.J. (2023). “A study on the design and implementation of a thermal imaging temperature screening system for monitoring the risk of infectious diseases in enclosed indoor spaces.” KIPS Transactions on Computer and Communication Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 85-92.

- [7] Kim, K.Y., Paik, N.W., Kim, Y.H., Yoo, K.H. (2018). “Bactericidal efficacy of non-thermal DBD plasma on staphylococcus aureus and Escherichia coli.” *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, Vol. 28, No. 1, pp. 61-79.
- [8] Koo, H.B. (2020). “Always-on quarantine air conditioning technology to reduce airborne infectious agents in indoor air.” *Air Cleaning Technology*, Vol. 33, No. 4, pp. 17-31.
- [9] Lee, H.J., Song, M.J. (2020). “A study on the effect of microbial sterilization using plasma generator with a flexible electrodes structure.” *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, Vol. 33, No. 1, pp. 70-77.
- [10] Lee, S.Y., Jung, H.S. (2022). External Electrode Part and Plasma Generating Device having Thereof, Patent NO. 10-2403123, Korean Intellectual Property Office, Daejeon.
- [11] Park, S.J., Park, G.Y., Park, D.H., Koo, H.B., Hwang, J.H. (2020). “Airborne infection risk of respiratory infectious diseases and effectiveness of using filter-embeded mechanical ventilator and infectious source reduction device such as air cleaner.” *Particle And Aerosol Research*, Vol. 16, No. 4, pp. 73-94.