

# 수중 비열 유전체장벽 방전 플라즈마로 처리한 양식장 배출수의 수질 변화 특성

조규석<sup>†</sup> · 박종호

<sup>†</sup>충청북도내수면산업연구소(연구사) · 충청북도내수면산업연구소(연구관)

## Characteristics of Change in the Water Quality of Fish Farm Effluent Treated with Underwater Non-thermal Dielectric Barrier Discharge Plasma

Kyu-Seok CHO<sup>†</sup> · Jong-Ho PARK

Department of Inland Fisheries Industrial Research Institute of Chung Cheong Buk-do(<sup>†</sup>researcher · research officer)

### Abstract

The purpose of this study is to evaluate the effects of underwater non-thermal Dielectric Barrier Discharge Plasma(DBD plasma) on fish farm effluent. This experiment was conducted in the DBD plasma generator, and the voltages given to generate DBD plasma were 11.6 kV and 23.1 kV. The measurement intervals were 0, 1, 5, 10 and 15 minutes. As a result of the experiment, the change in water quality was proportional to the strength of the voltage and the treatment time. At 23.1 kV for 15 minutes, the water temperature was increased to 51.1%, the pH was decreased by 26.2%, the dissolved oxygen was reduced to 50.3%, the chemical oxygen demand was reduced to 19.1% and the suspended solids was decreased 17.9%.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  was decreased by 95.8%, while  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  were increased by 851.8% and 170.2%. The total bacteria number contained in the discharge water was removed 100% at 23.1 kV for 15 minute, and the coliform group was sterilized up to 100% at 23.1 kV for 10 minute. The DBD plasma technology was found to reduce the organic pollutants and have high sterilization power against microorganisms in fish farm effluent.

**Key words :** Underwater DBD plasma, Fish farm effluent, Water quality, Argon gas

### I. 서론

내수면 양식장 배출수는 주변 하천과 호수의 부영양화를 유발하여 그 이용성을 저하시키게 하는데, 일반적으로 수량이 많고 오염물질 농도의 변화 폭이 상당히 크다는 점 등으로 인하여 기존의 통상적인 물리적, 화학적 및 생물학적 폐수처리방법으로 처리하기 어렵다고 보고되었다(Huh and Kang, 1995). 현재 내수면 양식장의 배출수

처리 방법은 중력에 의해서 고형물질을 제거하는 침전법이 적용되고 있다. 본 처리방식은 시설 설치가 간단하다는 장점이 있으나, 넓은 면적을 차지하고 처리효율이 낮다는 단점도 있다. 또한, 슬러지 처리가 곤란하여 침전조 내에 슬러지가 많이 쌓이게 된다. 여름철에는 오염 부하가 발생하여 배출수의 유기물 농도가 증가하게 되고, 신속히 처리하지 못한 침전된 슬러지는 분해되면서 암모니아 등 수생생물에게 유독한 물질로 전환된

<sup>†</sup> Corresponding author : 043-220-6521, kscho6146@korea.kr/orcid.org/0000-0002-2994-0747

\* 이 논문은 충북녹색환경지원센터(2021년)에서 지원받은 연구비에 의해 수행되었음.

다(Kim et al., 2016).

양식장 배출수의 효율적인 처리에 관한 다양한 연구가 수행되어 왔는데, 대표적인 것으로는 회전원판법(Cho et al., 1993), 살수여상법(Klemetson and Rogers, 1985), 활성슬러지법(Lee et al., 1997), 오존처리법(Park et al., 2018) 및 전기분해법(Lee, 2015) 등이 있다. 회전원판법, 살수여상법 및 활성슬러지법은 생물학적 처리 방법으로서 미생물에 의한 반응속도의 한계로 인해서 실제 양식장 배출수 처리에 적용하기에는 어려움이 많다. 오존은 강력한 산화력을 가지고 있어 양식장에 널리 사용되고 있지만, 오존 산화물의 독성으로 인해 사육하는 어류와 수중 미생물에 피해를 줄 수 있다(Park et al., 2018). 해수를 전기 분해하면 수중에서 발생하는 산화력이 강한 중간 생성물 즉, 차아염소산 등이 발생하여 암모니아를 산화시키게 된다. 이러한 방법은 질산화 과정을 거치지 않고 질소를 제거하기 때문에 처리시간 단축, 처리면적 축소 및 슬러지 생산량 감소 등의 장점이 있으나(Boo, 2000), 대부분 해수 양식장의 수처리 방법으로 적용되고 있다.

플라즈마를 활용한 수처리 기술은 환경친화적이고, 안전성이 뛰어나는 뿐만 아니라 비용 대비 효과가 우수한 것으로 알려져 있다(Pan et al. 2017). 특히, 유전체장벽 방전 플라즈마(Dielectric Barrier Discharge plasma, DBD plasma) 공정은 대기압에서도 고출력 방전이 가능하고 복잡한 펄스 전력 공급기가 없어도 된다(Kim et al., 2018). 그리고 종전의 수처리 공정과는 달리 약품 투입이 필요 없고 처리공정도 간단하며 2차 오염물질도 생성되지 않는 장점이 있어 최근 새로운 개념의 수처리 공정으로 인식되고 있다(Jung, 2009).

저온 플라즈마를 수중에서 발생시키면 다양한 산화 종인 OH radical, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 및 O<sub>3</sub>이 생성되어 오염물질에 대한 물리·화학적인 처리 효과를 가지는 것으로 평가되고 있다(Kim and Park, 2012; Kim and Won, 2018; Park et al., 2019).

플라즈마에 의해 발생하는 활성 종의 반감기는

아주 짧아서 대기에서 방전하는 것보다 수중에서 방전하는 것이 여러 활성 종들을 오염물에 직접 접촉시킬 수 있어 반응 효율성이 향상된다고 보고되었다(Shin et al., 2019). 그러나 국내 수산양식 분야에서 연구되고 있는 플라즈마 기술은 대부분 녹조 및 병원성 미생물 제거 등에 국한되어 있다(Lee et al., 2013; Kim et al., 2020; You et al., 2020). 따라서, 본 연구는 수중에서 DBD plasma를 발생시켜 양식장 배출수를 처리한 후 수질 성상, 유기물질 변화 및 미생물 제거 양상을 규명하여 양식 현장에 적용하기 위한 기초자료로 활용하고자 수행되었다.

## II. 연구 방법

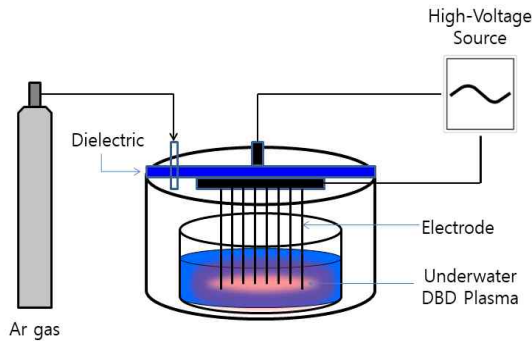
### 1. 시료 채취

충북 충주시 소재 뱀장어 양식장에서 채취한 배출수는 현장에서 직접 채취하여 냉장 상태로 이송 및 보관한 후 24시간 내 실험에 사용하였다.

### 2. DBD plasma 처리

DBD plasma 발생장치는 반응기, 전원공급기 및 가스 공급장치로 구성되었다. 반응기는 시료 300 mL을 처리할 수 있는 용량이며, 플라즈마를 발생시키는 전극봉을 시료 속에 잠기게 하여 수중방전을 유도하였다. 전원공급기는 입력전압을 100 V 및 200 V로 인가하였을 때 출력전압은 각각 11.6 kV 및 23.1 kV로 측정되었으며, 1분, 5분, 10분 및 15분간 처리하였다.

또한, 1 mTorr - 100 Torr 사이의 압력에서 1 cm 당 100 V 이상의 전계에서도 쉽게 플라즈마를 생성시키기 위하여 반응기 내로 아르곤 가스(2 L/min)를 주입하였다(Kim et al., 2018). 기타 DBD plasma 처리조건은 Zhang et al. (2018) 방법을 준용하였으며([Fig. 1]), 시료 분석은 DBD plasma 처리 후 즉시 실시하였다.



[Fig. 1] Schematic representation of underwater DBD plasma system.

### 3. 수질 분석

수질분석 항목은 환경부의 ‘수산물 양식시설 배출수 수질기준 설정 및 관리지침(2003년)’과 어류의 건강 상태에 영향을 미치는 요소를 고려하여 설정하였다. 수온(Temperature), 수소이온 농도(pH), 용존산소(dissolved oxygen, DO), 화학적 산소요구량(chemical oxygen demand, COD) 및 부유물질(suspended solids, SS)은 수질오염공정시험법(환경부 고시 제2017-4호)으로 측정하였고,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  및  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 은 이온크로마토그래피(ThermoFisher, ICS-1000, ICS-1500)로 분석하였다.

총균수는 평판배지 도말법으로 측정하였는데, 플라즈마 처리 전후의 수질 시료는 10배 단계 희석하여 Plate count agar(BD 247940)에 접종하고 25℃에서 48시간 배양한 후 생균수를 계수하였으며, 대장균군은 건조필름 제조사(3M, 6414)의 실험방법에 따라 실시하였다. 각 배지 상에 형성된 집락의 수는 Colony counter (Interscience, Scan 4000)로 분석하였다.

### 4. 통계 분석

실험결과는 Mean ± SD로 나타내었고, 통계처리하는 SPSS program(ver. 20)을 이용하여 신뢰도를 산출하였고, One-way ANOVA, Tukey’s multiple

range test로  $P<0.05$  수준에서 유의성을 검증하였다. Tukey 사후검정 결과,  $P<0.05$  수준에서 각 실험구간의 수질 측정값의 유의미한 차이는 [Fig. 2 ~ Fig. 11]에 첨자(a, b, c, d, e)로 표시하였으며, ANOVA test 결과, 독립변수인 시간에 대한 유의한 차이가 있을 때는 다른 첨자로 표시하였다.

## III. 결과 및 고찰

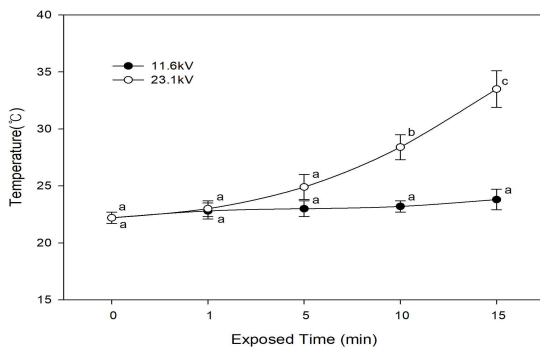
### 1. 수온, pH 및 DO의 변화

플라즈마 처리시간은 양식장 침전조에 적용할 것을 감안하여 1분, 5분, 10분 및 15분으로 설정하였다. DBD plasma를 15분간 처리한 후 수온 변화를 측정한 결과, 실험 시작 시 수온은  $22.2\pm 0.5$  °C이었으나, 11.6 kV에서  $23.8\pm 0.9$  °C이었고, 23.1 kV에서는  $33.5\pm 1.6$  °C까지 상승하였다([Fig. 2]). 양식장 배출수의 수온 상승은 주변 하천의 생물상에 영향을 줄 수 있어(Maeng et al., 2015), DBD plasma 발생장치에서 과도한 열이 발생하지 않도록 하는 연구가 필요한 것으로 사료된다.

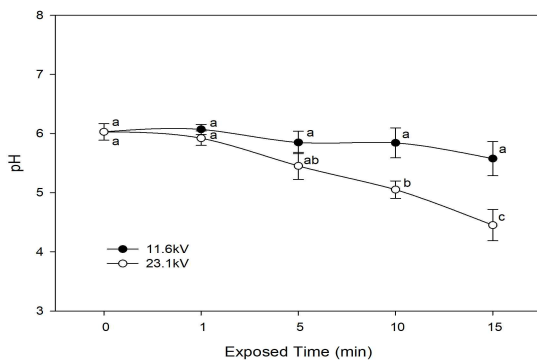
DBD plasma로 처리하기 전 pH는  $6.03\pm 0.14$ 이었는데, 15분 처리 후 11.6 kV에서는  $5.58\pm 0.29$ 로 감소하였고, 23.1 kV에서는  $4.45\pm 0.26$ 으로 감소하였다([Fig. 3]). 물이 산성화된 이유는 질소가 에너지를 받아 용해되어  $\text{NO}_2$ 로 전환되고, 다시 용해되고 해리되어 양성자( $\text{H}^+$ ) 농도를 증가시키기 때문이다(Sultana et al., 2015). DBD plasma에 의한 pH 감소는 유기물의 양에 따라 달라진다고 보고되었는데, Quyen et al.(2016)은 유기물이 많이 포함된 생활폐수보다 탈이온수에서 pH 감소 속도가 2배 더 빠르다고 보고하였다. 즉, 양식장 배출수의 유기물 농도에 따라 pH의 감소 속도가 달라질 수 있다고 볼 수 있다.

DO는 실험 전  $8.61\pm 0.12$  mg/L이었는데 DBD plasma로 15분간 처리했을 때 11.6 kV에서는  $6.24\pm 0.43$  mg/L이었고, 23.1 kV에서  $4.28\pm 0.48$  mg/L

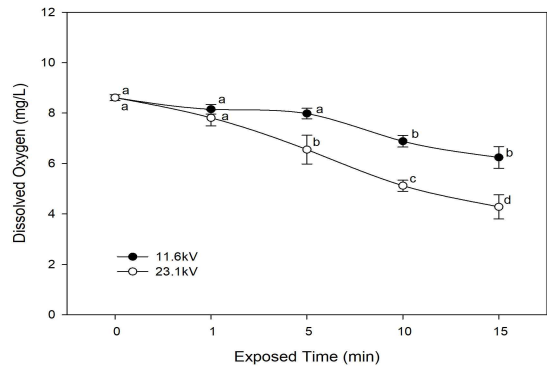
로 감소하였다([Fig. 4]). 타 연구 결과를 검토해보면 DBD plasma로 지하수를 13.71 kV에서 15분간 처리한 결과, DO는 6.50 mg/L에서 6.96 mg/L로 증가되었다(Shrestha et al., 2020). Tanakaran and Matra (2019)는 DBD plasma로 15 kV에서 30분간 폐수를 처리했을 때, DO는 7.23 mg/L에서 7.96 mg/L로 증가했다고 보고하여 본 연구의 결과와 상반된 결과를 보였는데 이는 플라즈마 시 발생한 열에 의해 수온 상승이 원인으로 사료된다.



[Fig. 2] Changes of temperature in the fish farm effluent exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ( $P<0.05$ ).



[Fig. 3] Changes of pH in the fish farm effluent exposed to DBD Plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ( $P<0.05$ ).



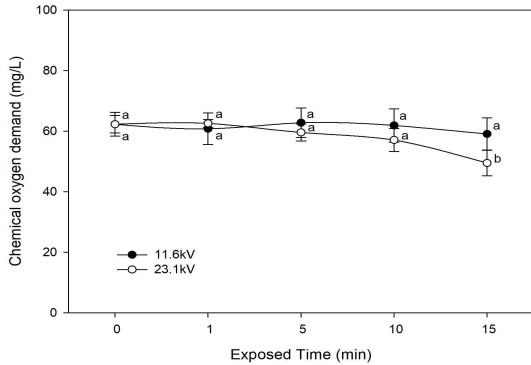
[Fig. 4] Changes of dissolved oxygen in the fish farm effluent exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ( $P<0.05$ ).

## 2. COD, SS의 변화

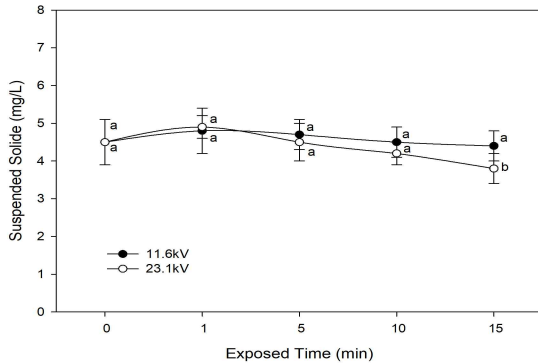
COD는 실험 전  $62.3\pm 3.9$  mg/L로 측정되었고, DBD plasma로 15분간 처리했을 때 11.6 kV에서는  $59.1\pm 5.3$  mg/L로 나타났고, 23.1 kV에서는  $49.5\pm 4.2$  mg/L로 감소 되었다([Fig. 5]). SS는 실험 시작 전  $4.5\pm 0.6$  mg/L로 측정되었다. DBD plasma로 15분간 처리했을 때 11.6 kV는  $4.4\pm 0.4$  mg/L로 특이적인 변화를 보이지 않았으나, 23.1 kV에서는  $3.8\pm 0.3$  mg/L로 유의한 변화를 보였다([Fig. 6]).

Quyen et al.(2016)은 공기를 주입한 DBD plasma 발생장치에서 전압 3.5 kV로 지표수와 생활하수를 120분간 처리한 결과, COD는 33~40%의 감소되었고, SS는 30~54% 감소하였다고 보고 하였다. 또한, Shin et al.(2019)은 공기를 주입한 DBD plasma 장치에서 전압 4 kV에서 90분간 처리했을 때 COD가 14.57% 제거되었다고 하였다. 또한, Jang et al.(2013)은 하수처리장 방류수 처리 연구에서 DBD plasma를 45분간 처리하였는데, 산소를 주입했을 때 COD는 68% 감소하였고, 공기를 주입했을 때 COD는 39% 감소했다고 보고 하였다. 그러나 기존 연구에서 COD와 SS의 감소

을 차이가 나타나는 것은 플라즈마 발생장치로 주입된 가스의 종류가 다르고, 각 활성 종들의 발생량 차이 및 전력공급에 따른 열 발생 정도에 따라 달라지는 것으로 보인다.



[Fig. 5] Changes of COD in the fish farm effluent exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ( $P<0.05$ ).

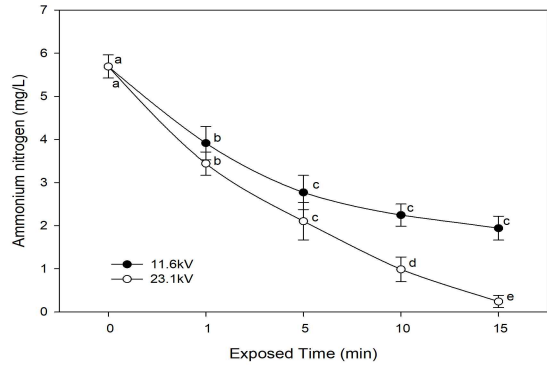


[Fig. 6] Changes of SS in the fish farm effluent exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ( $P<0.05$ ).

### 3. 질소화합물의 변화

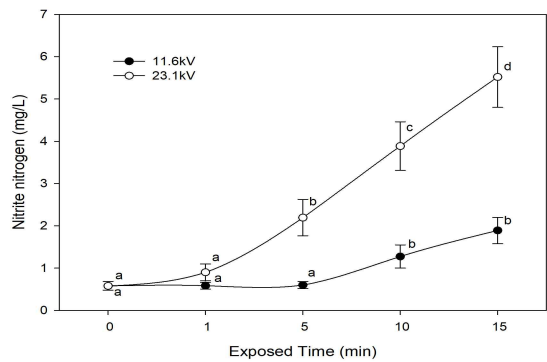
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 실험 시작 전  $5.69\pm 0.27$  mg/L이었는데, DBD plasma를 15분간 처리한 결과 11.6 kV는  $1.94\pm 0.28$  mg/L로 감소되었고, 23.1 kV는

$0.24\pm 0.14$  mg/L로 크게 감소되었다([Fig. 7]).



[Fig. 7] Changes of ammonium nitrogen in the fish farm effluent exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ( $P<0.05$ ).

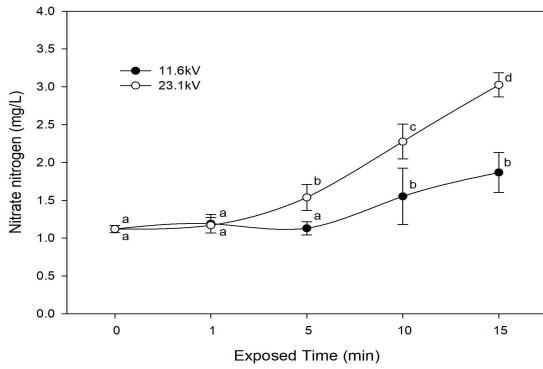
$\text{NO}_2\text{-N}$ 는 DBD plasma 노출 전  $0.58\pm 0.10$  mg/L이었고, 15분째 11.6 kV에서  $1.89\pm 0.31$  mg/L로 측정되었고, 23.1 kV에서는  $5.52\pm 0.72$  mg/L로 급격하게 증가 되었다([Fig. 8]).



[Fig. 8] Changes of nitrite nitrogen in the fish farm effluent exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ( $P<0.05$ ).

또한,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 실험 시작 전 측정치가  $1.12\pm 0.05$

mg/L이었으나, 15분째 11.6 kV에서  $1.87 \pm 0.27$  mg/L 이었고, 23.1 kV에서는  $3.03 \pm 0.16$  mg/L로 증가하였다([Fig. 9]).



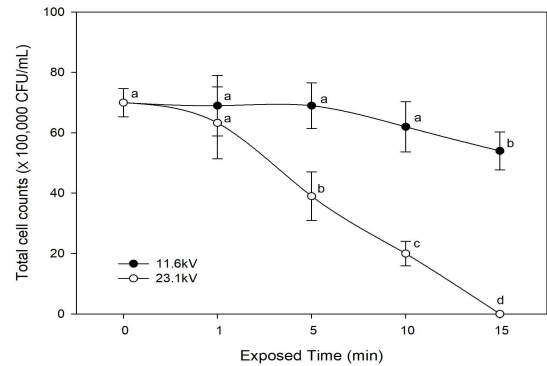
[Fig. 9] Changes of nitrate nitrogen in the fish farm effluent exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ( $P < 0.05$ ).

본 연구에서  $\text{NO}_2\text{-N}$ 는  $\text{NO}_3\text{-N}$ 보다 3~5배 더 높게 측정되었는데, Bruggeman et al.(2016)에 따르면 플라즈마에 의해 발생된 강력한 산화 중인 hydroxy radicals와  $\text{H}_2\text{O}_2$ 가 질소 산화의 첫 단계에서 형성되는  $\text{NO}_2\text{-N}$ 를 먼저 형성시키고 이후에  $\text{NO}_3\text{-N}$ 를 생성시킨다고 보고한 결과와 부합되는 것으로 보인다. 또한, Wu et al.(2021)이 플라즈마 발생장치의 전력 사용량을 증가시키면  $\text{NO}_2\text{-N}$ 과  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 발생량이 높아진다고 보고하였는데, 본 실험에서는 전력 사용량뿐만 아니라 처리시간을 증가시킬수록 질소화합물의 반응속도가 증가함을 알 수 있었다.

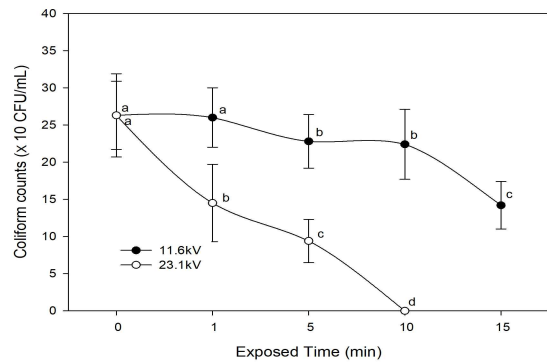
#### 4. 미생물 수의 변화

총균수는 실험 시작 전  $7.0 \times 10^6$  CFU/mL이었으나, DBD plasma 처리 15분째 11.6 kV에서  $5.4 \times 10^6$  CFU/mL로 감소되었다. 23.1 kV에서는 10분째  $2.0 \times 10^6$  CFU/mL로 감소되었고, 15분째는 검출되지 않았다([Fig. 10]). 대장균군은 실험시작

전  $2.6 \times 10^2$  CFU/mL이었으나, DBD plasma처리 15분 후 11.6 kV에서  $1.4 \times 10^2$  CFU/mL로 감소되었다. 23.1 kV에서는 실험 5분째  $9.4 \times 10^1$  CFU/mL로 감소되었고, 실험 10분째는 검출되지 않았다([Fig. 11]).



[Fig. 10] Changes of total cell counts in the fish farm effluent exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ( $P < 0.05$ ).



[Fig. 11] Changes of coliform counts in the fish farm effluent exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ( $P < 0.05$ ).

플라즈마 처리에 의한 미생물 살균효과는 그동안 많은 연구는 수행되었다(Kim et al., 2018; Kim

<Table 1> Changes in the water quality of fish farm effluent after exposure to plasma for 15 minutes

Parameters	Experimental groups			Rates of change(%)	
	Control	11.6 kV	23.1 kV	11.6 kV	23.1 kV
Temperature(°C)	22.2±0.5	23.8±0.9	33.5±1.6	7.2	51.1
pH	6.03±0.14	5.58±0.29	4.45±0.26	-7.5	-26.2
DO(mg/L)	8.61±0.12	6.24±0.43	1.28±0.48	-27.5	-50.3
COD(mg/L)	62.3±3.9	59.1±5.3	49.5±4.2	-5.2	-19.1
SS(mg/L)	4.5±0.6	4.4±0.4	3.8±0.3	-2.2	-17.9
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N(mg/L)	5.69±0.27	1.94±0.28	0.24±0.14	-65.9	-95.8
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N(mg/L)	0.58±0.10	1.89±0.31	5.52±0.72	226.2	851.8
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N(mg/L)	1.12±0.05	1.87±0.27	3.03±0.16	66.8	170.2
Total cell counts (×100,000 CFU/mL)	70.0±4.7	54.0±6.3	N.D.	-22.9	N.D.
Coliform counts (×10 CFU/mL)	26.3±5.6	14.2±4.2	N.D.	-46.1	N.D.

N.D. : No Detection

et al., 2020; Son and Lee, 2011). DBD plasma를 수중에서 방전시키면 활성 산소종(Reactive oxygen species, ROS)과 활성 질소종(Reactive nitrogen species, RNS) 및 Shock wave, 오존, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 등이 생성되기 때문에 미생물 살균효과를 기대할 수 있다(Kim et al., 2018; Shin et al., 2019). 특히 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 및 OH 라디칼 같은 활성산소는 미생물 세포막을 통해 확산되면서 세포막의 지질과 단백질, 그리고 세포 내의 DNA와 같은 거대 분자들과 반응하여 세포를 손상시켜 미생물을 사멸시킨다(Bogaerts et al., 2002). 수중 DBD plasma 처리 효과는 인가되는 전력량과 플라즈마 노출 시간 및 생성된 활성 종의 농도와 직접적인 관계가 있고, 이와 비례하여 세균증식 억제 효과를 나타내는 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용한 DBD plasma 발생장치로 양식장 배출수의 미생물 살균 시킬 경우, 23.1 kV에서 15분간 처리하면 대부분 제거되었다.

#### IV. 결론

본 연구는 DBD plasma에 의한 양식장 배출수

의 수질 변화를 평가하기 위하여 출력전압 11.6 kV와 23.1 kV에서 0, 1, 5, 10 및 15분간 처리하여 다음과 같은 결과를 얻었다(<Table 1>).

- 1) DBD plasma를 23.1 kV에서 15분간 처리했을 때 수온은 51.1%까지 상승하였고, pH는 26.2% 감소하였다. DO, COD 및 SS는 각각 50.3%, 19.1% 및 17.9% 감소하였다. 질소화합물 가운데 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N는 95.8% 감소하였으나, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N는 각각 851.8%와 170.2% 증가하였다.
- 2) 양식장 배출수내의 미생물에 대한 살균력을 조사한 결과, 총균수는 23.1 kV에서 15분간 처리했을 때 100.0% 제거되었고, 대장균군은 23.1 kV에서 10분간 처리했을 때 100% 제거되었다.
- 3) DBD plasma에 의한 양식장 배출수 변화는 플라즈마 발생장치의 특성, 주입되는 가스 종류 및 수질 상태 등에 따라 각각 다르게 나타나므로 현장 적용을 위해서는 향후 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## References

- Bogaerts A, Neyts E, Gijbels R and van der Mullen J(2002). Gas discharge plasmas and their application. *Spectrochim Acta Part B* 57, 609~658. [https://doi.org/10.1016/s0584-8547\(01\)00406-2](https://doi.org/10.1016/s0584-8547(01)00406-2)
- Boo CS(2001). The Removal Characteristics of Organic Matters and Ammonia in the Aquacultural Effluents by Electrolysis. Department of Environmental Engineering Graduate School Cheju National University 1~52.
- Bruggeman PJ, Kushner MJ, Locke BR, Gardeniers JGE, Graham WG, Graves DB, Hofman-Caris RCHM, Maric D, Reid JP and Ceriani E(2016). Plasma-liquid interactions: A review and roadmap. *Plasma Sources Science and Technology* 25(5), 1~116.
- Cho YG, Lee JK, Lee HM and Yang BS(1993). Optimization studies on water treatment process of seawater recirculation fish culture systems. *Journal of Aquaculture* 6(4), 311~321.
- Huh M and Kang BR(1995). Treatment of Inland Aquaculture Effluent by Biofilm Filtration Process (II). *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 17, 963~972.
- Jang DJ, Lee SY, Park JY, Seo SS and An GM(2013). Experimental Study on the effluent water quality improvement using the Plasma method, The 39th Regular academic conference. *Journal of Civil and Environmental Engineering Research* 3038~3041.
- Jung, JK(2009). Generation apparatus and method on the water plasma torch with high-density. Korean Patent 10-0924649.
- Kim DS and Park YS(2012). Development of Plasma Reactor of Dielectric Barrier Discharge for Water Treatment. *Journal of the Environmental Sciences* 21(5), 597~603. <https://doi.org/10.5322/JES.2012.21.5.597>
- Kim HJ and Won CH(2018). Temperature and Contact Time of Glow-Discharge Non-thermal Plasma for An Advanced Oxidation of Wastewater. *Journal of the Korean Society for Environmental Technology* 19(2), 108~115.
- Kim KY, Paik NW, Kim YH and Yoo KH(2018). Bactericidal Efficacy of Non-thermal DBD Plasma on *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene* 28, 61~79. <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2018.28.1.61>
- Kim SJ, Park SH, Jee BY, Kim YJ and Gwon MG(2020). Low frequency plasma disinfectant effect in seawater and three major fish bacterial disease pathogens. *Journal of fish pathology* 33(1), 91~95. <https://doi.org/10.7847/jfp.2020.33.1.091>
- Kim YH, Sohn SG, Lee YS, Choi HS and Huh MR(2016). Development of urban agricultural fertilizer of effluent water from BFT inland aquaculture. *Journal of People Plants and Environment* 19(5), 403~408. <https://dor.org/10.11628/ksppe.2016.19.5.403>
- Klemetson S and Rogers G(1985). Aquaculture Pond Temperature Modelling. *Aquaculture Engineering* 4, 191~208. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(85\)90013-5](https://doi.org/10.1016/0144-8609(85)90013-5)
- Lee KH, Jang KS, Kim SH and Park SW(2013). Performance assessment of apparatus for controlling algae bloom in aqua pet tank suing by a cold plasma. *Fisheries Technology* 49, 126~135. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2013.49.2.126>
- Lee MG, Suh KH and Oh YH(1997). Simultaneous Nitrification and Denitrification of Recirculating Aquaculture Water by Biofilter Reactor. *Journal of the Korean Environmental Society* 6(4), 409~416.
- Lee SM(2015). Generation of Free Residual Chlorine and Nitrogen Removal Characteristics in Aquaculture by using Electrolysis. Division of Earth Environmental System Sciences, Major of Environmental Engineering, The Graduate School, Pukyong National University 1~79. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2013.49.2.126>
- Maeng JH, Kim KY, Kim YR, Shon MB, Kim JH and Son MH(2015). Difference in macrobenthic community structures at thermal effluent discharge areas of two nuclear power plants in korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy* 18(3), 157~165. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2015.18.3.157>
- Pan J, Li YL, Tian Y, Yu S, Wang KL, Zhang J and Fang J(2017). Investigation of Cold Atmospheric Plasma-Activated Water for the Dental Unit Waterline System Contamination and Safety Evaluation in Vitro.



- Plasma Chem Plasma Process 37, 1091~1103.  
<https://dor.org/10.1007/s11090-017-9811-0>
- Park RM, Lee JC, Lee IH and Kim HW(2019). Nitrogen Removal Based on SCO/SCR Catalytic Reaction in Slaughterhouse Wastewater Treatment by Non-thermal Plasma, Chonbuk National University, Inc. Groon, Korean Society of Water and Wastewater, Korean Society on Water Environment 58.
- Park SD, Kim YH, Park JH and Kim PK(2018). Changes in Water Quality and Bacterial Compositions in Culture Water of an Ozonated Flounder Farm. Korean Journal of Environmental Biology 36(1), 90-97.  
<https://doi.org/10.11626/KJEB.2018.36.1.090>
- Quyen NT, Traikool T, Nitorisavut R and Onjun T(2016). Improvement of water quality using dielectric barrier discharge plasma. Journal of Physics: Conference Series 860, 1~7.  
<https://dor.org/10.1088/1742-6596/860/1/012031>
- Shin GW, Choi SK, Kim SK, Zhu Q, Weon KG and Lee SI(2019). Characteristics of phenol degradation by using underwater dielectric barrier discharge plasma. Journal of Korean Society of Water and Wastewater 33(4), 243~250.  
<https://doi.org/10.11001/jksww.2019.33.4.243>
- Shrestha R, Pradhan SP, Guragain RP, Subedi DP and Pandey BP(2020). Investigating the Effects of Atmospheric Pressure Air DBD Plasma on Physio-Chemical and Microbial Parameters of Groundwater. Open Access Library Journal 7, 1~13.  
<https://dor.org/10.4236/oalib.1106144>
- Son HH and Lee WG(2011). Treatment of Ar/O<sub>2</sub> Atmospheric Pressure Plasma for Sterilization. Applied Chemistry for Engineering 22, 261-265.
- Sultana S, Vandenbroucke AM, Leys C, De Geyter N and Morent R(2015). Albatement of VOCs with alternate adsorption and plasma-assisted regeneration: a review. Catalysts 5, 718~746.  
<https://doi.org/10.3390/catal5020718>
- Tanakaran Y and Matra K(2019). Wastewater treatment by dielectric barrier discharge plasma, Journal of Physics: Conference Series 1285, 1~8.  
<https://dor.org/10.1088/1742-6596/1285/1/012015>
- Wu S, Thapa B, Rivera C and Yuan Y(2021). Nitrate and nitrite fertilizer production from air and water by continuous flow liquid-phase plasma discharge, Journal of Environmental Chemical Engineering 9(2), 104761.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104761>
- You JH, Lee JH, Mun SH, Kwon SR, Park TS and Kwon JY(2020). Disinfection effect of corona discharged plasma water on fish pathogens. Journal of fish Pathology 33(1), 63~69.  
<https://doi.org/10.7847/jfp.2020.33.1.063>
- Zhang JJ, Kwon TH, Kim SB and Jeong DK(2018). Plasma Farming: Non-Thermal Dielectric Barrier Discharge Plasma Technology for Improving the Growth of Soybean Sprouts and Chickens. Plasma 1, 285~296.  
<https://dor.org/10.3390/plasma1020025>
- 
- Received : 16 October, 2022
  - Revised : 01 December, 2022
  - Accepted : 09 December, 2022