

수중 비열 유전체장벽 방전 플라즈마를 이용한 양식어류의 병원성세균 3종 및 Tetracycline계 항생제 제거

조규석* · 박종호

충청북도내수면산업연구소

Remove of Three Pathogenic Bacteria in Cultured Fish and Tetracycline Antibiotics Using Underwater Non-Thermal Dielectric Barrier Discharge Plasma

Kyu Seok Cho* and Jong Ho Park

Inland Fisheries Industrial Research Institute of Chungcheong Buk-do, Chungju 27432, Republic of Korea

The purpose of this study is to evaluate the effect of underwater non-thermal dielectric barrier discharge plasma (DBD plasma) on the sterilization of three types of pathogenic bacteria that cause diseases in freshwater fish and the reduction of a tetracycline antibiotics. This experiment was conducted in the DBD plasma generator, and the voltages used to generate plasma were 11.6 kV and 23.1 kV. The measurement intervals were 0, 1, 5, 10 and 15 min. As a result of DBD plasma treatment, *Aeromonas hydrophila*, *Edwardsiella tarda* and *Pseudomonas fluorescens* were removed 93–99% after 5 min at 23.1 kV, and the tetracycline antibiotics were reduced 70–95% after 15 min at 23.1 kV. In this study, as a result of treating the effluent with DBD plasma at a fish farm where the medicinal bath was conducted with oxytetracycline-HCl (OTC-HCl) products, OTC-HCl decreased by 62% after 10 min at 23.1 kV.

Keywords: Underwater non-thermal DBD plasma, Fish bacterial disease, Tetracycline antibiotics

서 론

해양수산부 수산정보포털 자료에 따르면 최근 3년간 내수면 양식생산량은 '18년 27.8천톤, '19년 27.5천톤, '20년 25.7천톤으로 정체되거나 감소되고 있는 실정이다(MOMAF, 2016). 내수면 양식산업이 침체된 근본 원인은 1990년대 초반 정부의 물관리 정책 강화로 볼 수 있지만, 현재 시점에서는 양식용수의 부족에 의한 사육환경 악화 및 질병발생을 증가 등도 큰 비중을 차지한다고 볼 수 있다(Lee and Kim, 2006; Park, 2018). 충청북도내수면산업연구소 수산질병관리원에서 자체 조사를 실시한 결과, 충북지역 내수면 양식장에서 발생하는 세균성질병의 원인균 가운데 가장 많은 빈도로 검출되는 것은 *Aeromonas hydrophila*, *Edwardsiella tarda* 및 *Pseudomonas fluorescens* 이었다. 이러한 세균성질병을 예방하기 위해서 양어용수의 소독이 필요한데, 양식장에서 주로 사용하는 방법은 약품처리, 자

외선 및 오존 살균 등이다. 그러나 소독약품 사용에 의한 2차적 환경오염이 발생하고, 살균장치를 장기간 사용함에 따라 소독 효율이 저하될 뿐만 아니라 다량의 양식용수를 처리하는데 어려움이 있어 대안이 필요한 실정이다. 양식장에서 세균성 질병의 치료목적으로 사용하는 항생제는 생물에 완전히 흡수되거나 대사되는 약물은 거의 없으므로 접촉한 약물을 전부 회수하는 것은 불가능하다(Kim, 2010). 한국동물약품협회 자료를 보면 '20년도 수산용 항생제 판매량은 총 158톤으로 집계되었으며, 이 가운데 tetracycline 계열이 전체의 54%를 차지하고 있다. 동물용 항생제는 하수처리 과정 없이 환경 중으로 배출되는 경우가 많아서 높은 농도로 직접 배출될 수 있고, 직·간접적으로 사람이나 생물 수용체에 노출되어 생태계를 교란시킬 수 있다(Kim et al., 2008). 한강 유역에서 항생제 실태를 조사한 결과를 보면 tetracycline이 2,093 ng/L로 검출되어 조사한 항생제 가운데 가장 높은 수치를 보였다(Kim et al., 2008). 특히,

*Corresponding author: Tel: +82. 43. 220. 6521 Fax: +82. 43. 220. 6529

E-mail address: kscho6146@korea.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0910>

Korean J Fish Aquat Sci 55(6), 910-916, December 2022

Received 4 July 2022; Revised 15 August 2022; Accepted 3 November 2022

저자 직위: 조규석(연구사), 박종호(연구관)

tetracycline, oxytetracycline 및 doxycycline은 인수공용으로 사용되고 있기 때문에 심각한 항생제 내성 문제를 일으킬 수 있다(Jia et al., 2009).

대기압에서 플라즈마를 만들기 위해서는 자연상태의 원자나 분자를 이온화 시켜야 하는데, 그러기 위해서는 수백만도의 높은 열을 가해주어야 한다. 그러나 높은 전기를 가해주면 낮은 온도에서도 원자나 분자를 이온화 시킬 수 있는데, 저온에서 발생한 플라즈마는 불안정하게 이온화된 분자 또는 원자 등으로 반응성이 높은 화학 종(radical)들이 생겨 매우 다양한 분야에 적용되고 있다. 대기압 저온 플라즈마는 발생원(source)의 기전에 따라 코로나 방전 플라즈마(corona discharged plasma)와 비열 유전체장벽 방전 플라즈마(non-thermal dielectric barrier discharge plasma, DBD plasma)로 구분된다. 코로나 방전의 경우는 전극 제작이 간단하며, 구조 또한 단순하므로 가격이 저렴하지만 방전 시 다량의 오존이 생성되고 그 수명이 길어 생물에 해를 끼치며, 아울러 발생하는 음이온의 수명이 매우 짧은 편이고, 자외선의 생성 량도 적어 살균효과도 약하며, 플라즈마의 체적이 매우 작기 때문에 처리 면적이 작은 영역으로 한정될 수 밖에 없어서 처리 효과가 국부적으로 나타나게 된다(Kim et al., 2018).

반면에 DBD plasma는 대기압에서도 고출력 방전이 가능하고 복잡한 펄스 전력 공급기가 없어도 되며 열 발생이 높지 않기 때문에 농식품분야, 바이오 및 의료분야 등에서 널리 사용되고 있는데, DBD plasma를 수중에서 발생시키면 자외선, shock wave, H₂O₂, 오존 등의 화학적 활성종이 생성되는 것으로 알려져 있다(Locke et al., 2006; Joshi and Thagard, 2013; Stratton et al., 2015). 활성종의 반감기는 아주 짧기 때문에 대기에서 방전하는 것 보다 수중에서 방전하는 것이 여러 활성종들을 오염물에 직접 접촉시킬 수 있어 반응 및 에너지 효율성이 향상된다고 보고되었다(Shin et al., 2019).

본 연구의 목적은 수중에서 DBD plasma를 발생시켜 담수어류에서 질병을 유발하는 병원성세균 3종과 양식장에서 가장 많이 사용하고 있는 tetracycline계 항생제를 제거하는 효과를 규명하는데 있다.

재료 및 방법

시료채취

충북 충주시 소재 뱀장어 양식장의 침전조에서 배출수를 채취하여 냉장상태로 연구소로 이송 및 보관한 후 24시간 내 실험에 사용하였다.

수중 DBD plasma 처리

DBD plasma 발생장치는 반응기, 전원공급기 및 가스공급기로 구성되어 있다. 반응기는 수질시료 300 mL을 처리할 수 있는 용량이며, 플라즈마를 발생시키는 전극봉을 물 속으로 잠기

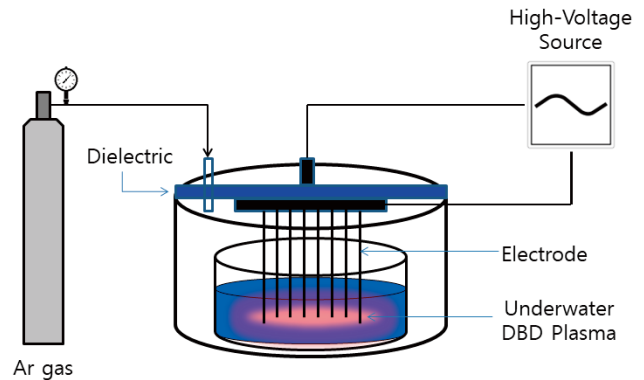


Fig. 1. Schematic representation of underwater DBD plasma system. DBD, non-thermal dielectric barrier discharge.

게 하여 수중방전을 유도하였다. 플라즈마 처리를 위해 전원공급기의 입력전압을 각각 100 V와 200 V로 맞추었고, 이때 출력전압은 11.6 kV 및 23.1 kV이었다. DBD plasma 노출시간은 0분, 1분, 5분, 10분 및 15분으로 설정하였고, 1 mTorr–100 Torr 사이의 압력에서 1 cm당 11.6 kV 이상의 전계에서도 쉽게 플라즈마를 생성시키기 위하여 반응기내로 아르곤 가스(2 L/min)를 주입하였다. 기타 DBD plasma 처리조건은 Zhang et al. (2018) 방법을 준용하였고(Fig. 1), 시료분석은 DBD plasma 처리 후 즉시 실시하였다.

오존 측정법

수중 DBD plasma에서 발생하는 활성종은 대부분 수명이 짧아 일반적인 분석기로는 측정이 어렵지만, 오존은 비교적 반감기가 길어 측정이 가능한 것으로 알려져 있다(Jo et al., 2013). 실험은 각 플라즈마 처리 간격마다 시료를 채취한 후 분광광도계(PhotoLab 6100VIS; WTW, Weilheim, Germany)를 이용하여 ozone test kit (Merck, Darmstadt, Germany)로 분석하였다.

병원성세균 분석

A. hydrophila, *E. tarda* 및 *P. fluorescens* 균주는 충청북도내 수면산업연구소 수산질병관리원에서 제공받아 실험에 사용하였다. 각 균주는 tryptic soy broth (TSB)를 사용하여 25°C에서 24–48시간 배양한 후에 멸균 증류수로 희석하여 *A. hydrophila*는 2.5×10^5 CFU/mL, *E. tarda*는 1.8×10^5 CFU/mL 및 *P. fluorescens*는 1.7×10^5 CFU/mL로 조정하였다. 그리고 DBD plasma 발생장치에서 살균 처리하여 노출 전후의 생균수 변화를 측정하였다.

Tetracycline계 항생제 분석

수중 DBD plasma 처리에 의한 항생제 변화를 측정하기 위하여 내수면 양식장에서 가장 흔하게 사용되는 tetracycline계 항생제를 선정하였다. 실험은 표준품인 VFDA Mix-2 (Kemidas,

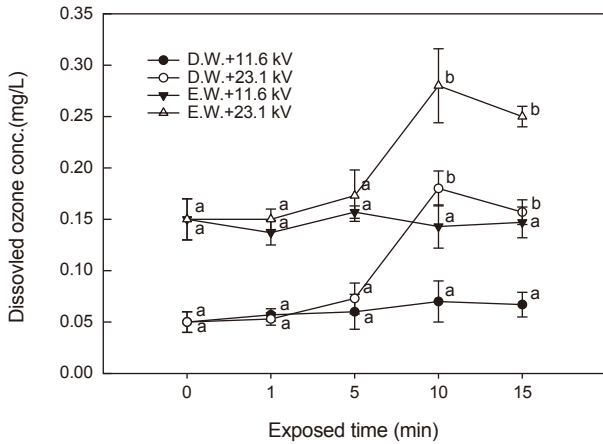


Fig. 2. Changes of dissolved ozone levels in the D.W. and E.W. exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ($P < 0.05$). D.W., Distilled water; E.W., Effluent water; DBD, non-thermal dielectric barrier discharge.

Suwon, Korea)를 사용하였고, methanol로 표준원액을 만든 뒤 단계적으로 희석하여 표준용액을 제조하였다. 제조된 표준용액은 DBD plasma 발생장치에 넣어졌고 플라즈마를 처리한 후 tetracycline, doxycycline, oxytetracycline 및 chlortetracycline의 농도 변화를 측정하였다. 또한, 현장 실증연구를 위해서 옥시테트라사이클린 염산염(D사, 역가 50%) 제품을 약육을 실시한 내수면양식장 침전조에서 배출수를 채수하여 실험실로 옮긴 후 수중 DBD plasma 처리효과를 분석하였다. 기기분석은 액체크로마토그래프-질량분석기(Xevo TQ-XS; Waters, Milford, MA, USA)를 사용하여 실시하였다.

통계분석

실험결과는 Mean \pm SD로 나타냈고, 통계처리는 SPSS program (ver. 20)을 이용하여 신뢰도를 산출하였다. One-way ANOVA, Tukey's multiple range test를 이용하여 $P < 0.05$ 수준에서 유의성을 검증하였다.

결과 및 고찰

DBD plasma는 산소 함유량이 높을수록 오존과 활성종의 발생량이 많아져 분해율이 높은 것으로 알려져 있다(Sato et al., 2008; Park, 2013). 본 연구에서는 DBD plasma 처리에 따른 증류수와 배출수의 오존량 변화를 조사하였다(Fig. 2). 전압 11.6 kV에서는 유의적인 변화를 보이지 않은 반면에, 전압 23.1 kV에서는 증류수와 배출수에서 모두 유의적인 증가를 나타냈다. 증류수의 경우 실험시작 시에 0.05 mg/L이었으나, 10분째 0.18 mg/L로 증가되었고, 15분째는 0.16 mg/L로 약간 감소하였다. 배출수는 실험시작 시 0.15 mg/L이었는데, 23.1 kV에서 10분

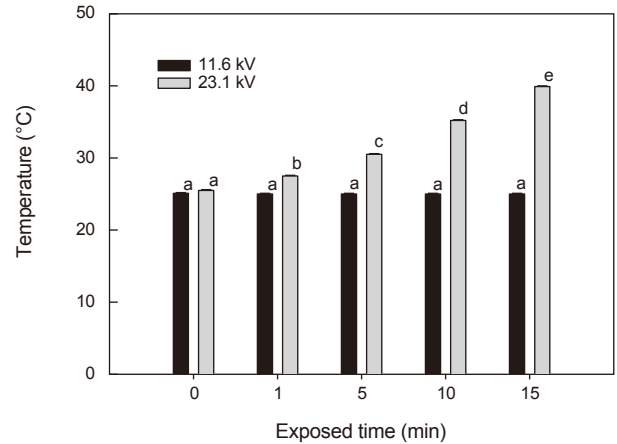


Fig. 3. Changes of temperature in the distilled water exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ($P < 0.05$). DBD, non-thermal dielectric barrier discharge.

째 측정된 결과 0.26 mg/L이었고, 15분째 0.23 mg/L로 나타났다.

DBD plasma 장치에서 발생한 열에 의한 수온 변화는 Fig. 3에 나타났다. 실험기간동안 11.6 kV에서는 수온변화를 보이지 않았으나, 23.1 kV에서 플라즈마 노출시간이 길어질수록 수온이 증가하는 경향을 보였다. 실험시작 시 수온은 25.5°C이었는데, 노출 1분째 27.5°C, 5분째 30.5°C, 10분째 35.2°C 및 15분째는 최대 39.9°C까지 증가하였다. Shin et al. (2019)의 연구에 의하면 DBD plasma에 의해서 발생하는 열은 오존의 용해성을 떨어뜨려 수중의 오존량을 감소시킨다고 보고하였는데, 본 실험에서도 23.1 kV에서 10분째까지는 오존량이 증가하다가 15분째부터는 다시 감소하는 결과를 보여 오존량 감소가 수온 증가와 관련이 있는 것으로 사료된다. Kim and Park (2011)에 따르면 플라즈마 발생시 생성되는 열은 반응기의 형태 및 세부사항에 따라 달라진다고 보고하였는데, 오존 발생량을 유지시키고 수온의 상승에 의한 2차적인 어류 피해를 최소화하기 위해서는 DBD plasma 발생장치에서 과도한 열이 발생되지 않도록 제어하는 연구도 진행되어야 할 것으로 판단된다.

A. hydrophila, *E. tarda* 및 *P. fluorescens*는 다양한 내수면 어종에서 급성 및 만성적 폐사를 유발하여 큰 경제적 손실을 일으킨다(Xu and Zhang, 2014; Reyes, 2018; Duman et al., 2021). DBD plasma에 노출시킨 *A. hydrophila*는 11.6 kV에서 5분째 76%, 10분째 96%가 감소되었고, 15분째부터는 검출되지 않았다. 23.1 kV에서는 1분째 92%, 5분째 99%로 감소하다가 10분 이후부터는 검출되지 않았다(Fig. 4). *E. tarda*는 11.6 kV에서 10분째 44% 감소하였고, 15분째는 89%까지 제거되었다. 전압 23.1 kV에서는 1분째 33%, 5분째 99% 감소하다가 10분 이후로는 검출되지 않았다(Fig. 5). *P. fluorescens*는 11.6 kV에

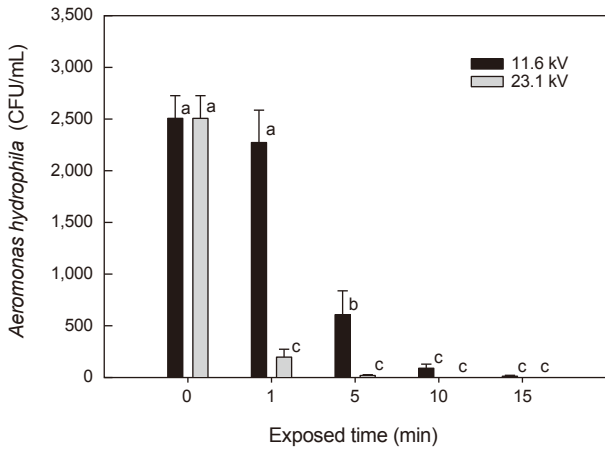


Fig. 4. Changes in the number of *Aeromonas hydrophila* exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ($P < 0.05$). DBD, non-thermal dielectric barrier discharge.

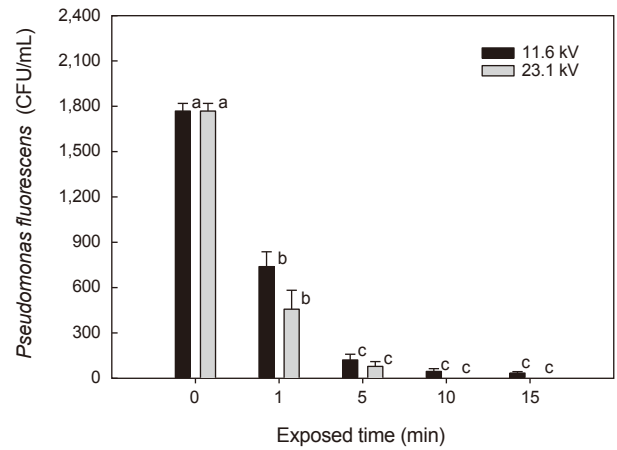


Fig. 6. Changes in the number of *Pseudomonas fluorescens* exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ($P < 0.05$). DBD, non-thermal dielectric barrier discharge.

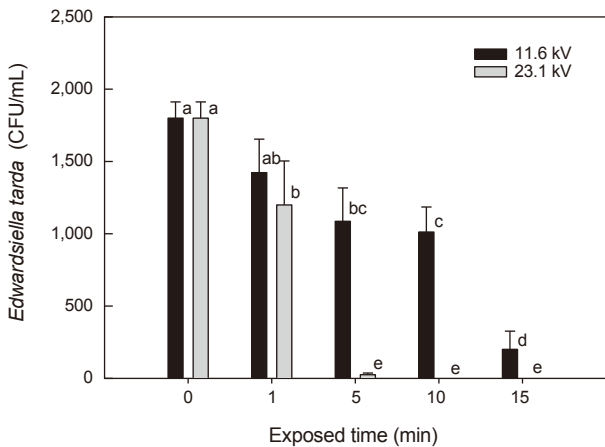


Fig. 5. Changes in the number of *Edwardsiella tarda* exposed to DBD plasma. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ($P < 0.05$). DBD, non-thermal dielectric barrier discharge.

서 15분까지 98%가 감소되었고, 23.1 kV에서는 1분째 74%, 5분째 96%가 제거되었다(Fig. 6). 저온 플라즈마 장치를 이용하여 해수 내 어류 병원성세균을 제거한 실험(Kim et al., 2020)과 코로나 방전 플라즈마 처리수를 이용하여 *A. salmonicida* 및 *Streptococcus iniae*를 살균시킨 연구결과와 일치하는 경향을 보였다(You et al., 2020). 그러나 병원성세균의 처리효율 비교는 플라즈마 발생 원리의 차이, 제작된 발생장치의 차이 및 수질상태 등에 따라 다르게 나타나기 때문에 실험결과에 대한 직접 비교는 어려웠다. DBD plasma를 수중에서 방전시키면 su-

peroxide anion ($\cdot O_2$)과 hydroxyl radical ($\cdot OH$) 등과 같은 활성 산소종(reactive oxygen species, ROS)과 nitric oxide (NO) 등과 같은 활성질소종(reactive nitrogen species, RNS) 및 Shock wave, 오존, 과산화수소 등이 생성되기 때문에 미생물 살균효과를 기대할 수 있다(Kim et al., 2018; Shin et al., 2019). 특히 과산화수소 및 OH 라디칼 같은 활성산소는 미생물 세포막을 통해 확산되면서 세포막의 지질과 단백질, 그리고 세포 내의 DNA와 같은 거대 분자들과 반응하여 세포를 손상시켜 살균효과를 나타낸다(Bogaerts et al., 2002). Ryu et al. (2013)은 DBD plasma 처리 시 전력량과 노출시간이 증가할수록 그리고 노출거리가 짧을수록 활성종인 오존(O_3), 일산화질소(NO), 이산화질소(NO_2) 등의 농도가 증가되어, 병원성미생물의 사멸효과가 증가한다고 보고하였다. 따라서, 수중 DBD plasma 처리 효과는 인가되는 전력량과 플라즈마 노출시간 및 생성된 활성종의 농도와 직접적인 관계가 있고, 이와 비례하여 세균증식 억제 효과를 나타내는 것으로 판단된다.

플라즈마 처리에 의한 세균의 제거 양상은 세균의 종류 및 플라즈마 처리 방법 등에 따라 다르게 나타나는데, Kim et al. (2018)의 연구에 따르면 고체배지에 그람 양성균인 *Staphylococcus aureus*와 그람 음성균인 *Escherichia coli*를 각각 접종한 후 DBD plasma 장치의 챔버 내에서 공기 살균을 실시한 결과, 95–100% 사멸되는데 걸리는 시간이 *E. coli*는 2시간인데 반해 *S. aureus*는 6시간이 소요되었다고 밝혀 세균 종류에 따라 다른 결과를 나타낸다고 보고하였다. 본 연구는 수중에서 직접 DBD plasma를 처리함으로써 병원성세균을 신속히 제거할 수 있었으며, 각 세균 종류에 따라 제거되는 패턴에 다소 차이는 있었으나, 모두 23.1 kV에서 5분째 93–99% 살균되는 것으로 볼 수 있다.

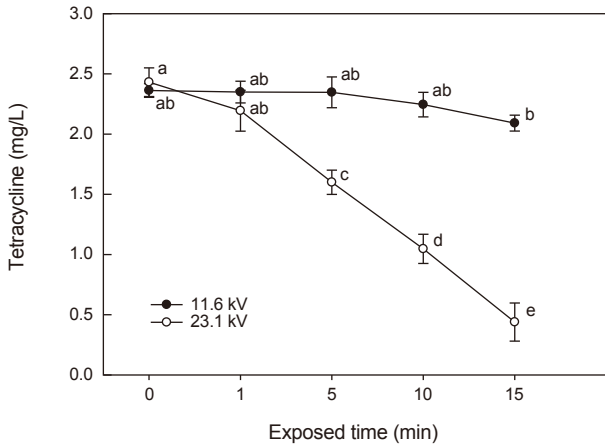


Fig. 7. Elimination effects of tetracycline by DBD plasma technique. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ($P < 0.05$). DBD, non-thermal dielectric barrier discharge.

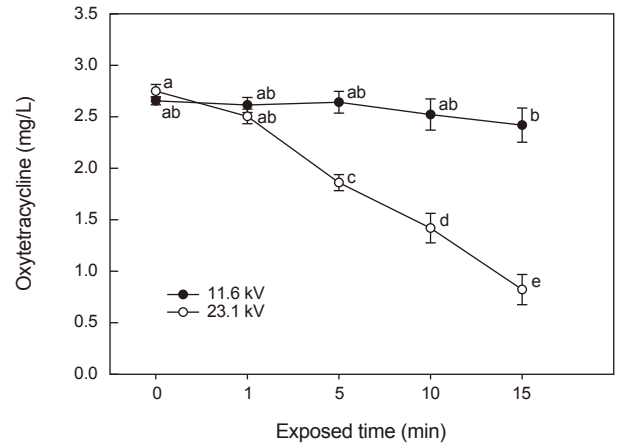


Fig. 9. Elimination effects of oxytetracycline by DBD plasma technique. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ($P < 0.05$). DBD, non-thermal dielectric barrier discharge.

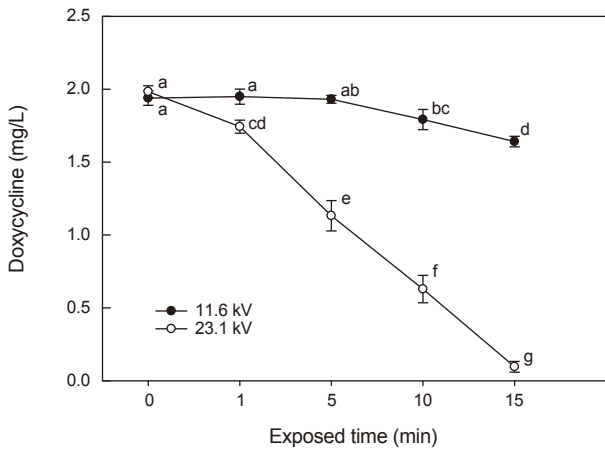


Fig. 8. Elimination effects of doxycycline by the DBD plasma technique. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ($P < 0.05$). DBD, non-thermal dielectric barrier discharge.

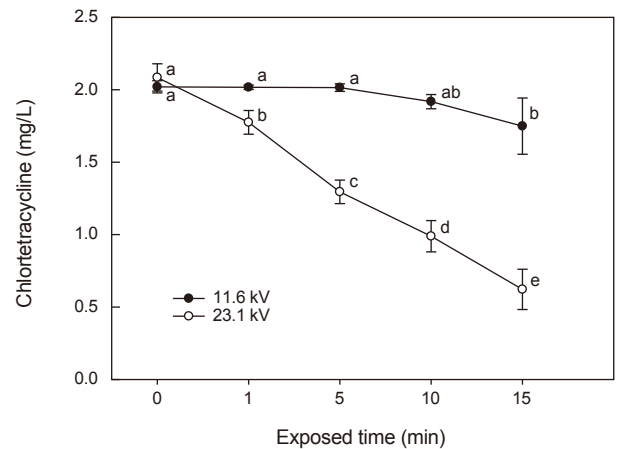


Fig. 10. Elimination effects of chlortetracycline by DBD plasma technique. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey's multiple range test ($P < 0.05$). DBD, non-thermal dielectric barrier discharge.

한강 유역에서 항생제 잔류조사를 실시한 결과, tetracycline 이 2,093 ng/L까지 검출되어 조사한 다른 항생제에 비해 가장 높은 수치를 나타냈다(Kim et al., 2008). 따라서 본 연구에서는 양식장 배출수를 통해 tetracycline계 항생제가 유출되는 것을 방지하기 위하여 DBD plasma를 이용하여 제거하는 실험을 실시하였다. Tetracycline은 11.6 kV에서는 15분 노출 후에 11% 제거된 것으로 조사되었고, 23.1 kV에서는 노출 5분째 34%, 10분째 57% 및 15분째 82% 제거되는 것으로 나타났다(Fig. 7). Doxycycline은 11.6 kV에서 노출 10분째부터 유의적인 감소가 보이다가 15분째는 15%가 제거되었고, 23.1 kV에서는 1분째부터 12% 감소되었고, 5분째 43%, 10분째 68% 및 15분

째 95%가 제거되었다(Fig. 8). Oxytetracycline은 11.6 kV에서는 노출 15분째부터 유의적인 감소를 보였고, 23.1 kV에서는 노출 5분째 32%, 10분째 48% 및 15분째 70%가 제거되었다(Fig. 9). Chlortetracycline도 비슷한 양상을 보였는데, 11.6 kV에서 15분째 약간 감소하였고, 23.1 kV에서는 1분째 9%, 5분째 32%, 10분째 48% 및 15분째 70%가 감소하였다(Fig. 10). 또한, 본 연구에서는 실제 옥시테트라사이클린 염산염 제품을 사용한 양식장의 침전조에서 배출수를 채수한 후 DBD plasma를 처리한 결과, 11.6 kV에서 15분째 25%가 감소되었고, 23.1 kV에서는 10분째 62%로 감소되는 결과를 보였다(Fig. 11). 본 현장 연구결과는 oxytetracycline 표준물질을 대상으로 실험한

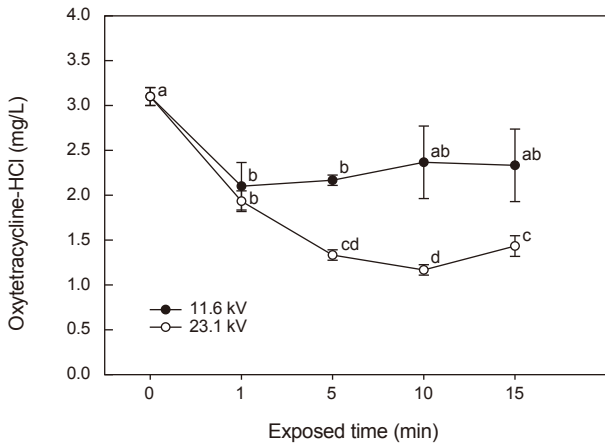


Fig. 11. Elimination effects of residual oxytetracycline-HCl in the effluent wastewater of fish farm by DBD plasma Technique. Mean upper the bar with different superscripts for each exposed voltages are significantly different by Tukey’s multiple range test ($P < 0.05$). DBD, non-thermal dielectric barrier discharge.

결과와 감소되는 경향이 다른 것으로 나타났는데, 양식장 배출수 내에 포함된 다양한 유기물질 및 녹조류 등에 의한 복합적인 영향에 의한 것으로 판단된다. 대기압 저온 플라즈마에 의한 tetracycline의 분해는 hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$)과 오존(O_3)에 의한 상호작용에 의한 것으로 보고되었고(Fang et al., 2022), Yao et al. (2022)은 ROS와 Oxytetracycline의 핵심구조인 C_2 site의 acylamino, C_4 site의 dimethylamine 그리고 C_{10} - C_{12} 구조와 C_{12} site에 tertiary alcohol의 상호작용으로 oxytetracycline 구조가 왜곡되거나 파괴된다고 보고하였다.

기존 항생제 처리방법은 흡착법, 오존, 과산화수소와 같은 산화제 및 광촉매, UV 등의 공정을 결합한 고급산화공정(advanced oxidation process, AOP)이 있으나, 최근에는 저온 플라즈마를 이용한 항생제 제거 방법이 연구되고 있다. Magureanu et al. (2011)은 DBD plasma를 사용하여 β -lactam계 항생제인 amoxicillin, oxacillin 및 ampicillin의 분해능을 연구한 결과 amoxicillin은 10분 후에 분해되었고, oxacillin과 ampicillin은 30분후에 분해되어 각 항생제 종류에 따라 다른 결과를 보였다. Lou et al. (2012)은 chloramphenicol로 오염된 토양의 정화능을 검토한 결과, DBD plasma를 20분간 처리했을 때 chloramphenicol이 81%까지 제거되었다고 보고하여 난분해성 항생제를 포함한 폐수 및 토양처리에 매우 효과적인 공정이라고 제안하였다. Nguyen et al. (2021)이 연구한 바에 따르면 병원의 배출수 내 항생제 제거를 위해서 코로나 방전 플라즈마로 30 kV에서 15분간 처리한 결과, ciprofloxacin과 cefuroxime은 거의 100% 제거되었고, ofloxacin과 amoxicillin은 72%까지 감소했다고 보고하였다. 양식장에서는 tetracycline계 항생제를 약용하는 방법으로 사용하는 경우가 많기 때문에 고농도의 항생제가

유출될 수 있고, 배출수의 양도 많기 때문에 DBD plasma 등의 기술을 적용하는 것이 효과적일 수 있다.

본 연구에서는 수중 DBD plasma 기술을 이용하여 출력전압 23.1 kV에서 5분간 처리했을 때 *A. hydrophila*, *E. tarda* 및 *P. fluorescens*는 93–99% 제거할 수 있었고, tetracycline 계열 항생제 4종은 23.1 kV에서 15분간 처리했을 때 70–95% 감소시키는 것을 확인하였다. 그러나 수중 DBD plasma 기술을 순환 여과시스템 및 배출수 처리시스템 등 양식 현장에 적용하기 위하여 DBD plasma 발생장치와 주입되는 가스의 종류 및 출력전압의 세기 등 발생조건에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구 결과물은 2021년도에 환경부와 충청북도의 재원으로 충북녹색환경지원센터의 지원(21-03-30-31-16)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Bogaerts A, Neyts E, Gijbels R and van der Mullen J. 2002. Gas discharge plasmas and their application. *Spectrochim Acta Part B At Spectrosc* 57, 609-658. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00406-2](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00406-2).
- Duman M, Mulet M, Altun S, Saticioglu IB, Ozdemir B, Ajmi N, Lalucat J and Garcia-Valdes E. 2021. The diversity of *Pseudomonas* species isolated from fish farms in Turkey. *Aquaculture* 535, 736369. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736369>.
- Fang C, Wang S, Xu H and Huang Q. 2022. Degradation of tetracycline by atmospheric-pressure non-thermal plasma: Enhanced performance, degradation mechanism, and toxicity evaluation. *Sci Total Environ* 812, 152455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152455>.
- Jia A, Yang X, Hu J, Asami M and Kunikane S. 2009. Simultaneous determination of tetracyclines and their degradation products in environmental waters by liquid chromatography electrospray tandem mass spectrometry. *J Chromatogr A* 1216, 4655-4662. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.03.073>.
- Jo JO, Lee SB and Mok YS. 2013. Decolorization of azo dyeing wastewater using underwater dielectric barrier discharge plasma. *Appl Chem Eng* 24, 544-550.
- Joshi RP and Thagard SM. 2013. Streamer-like electrical discharges in water: Part II. Environmental applications. *Plasma Chem Plasma Process* 33, 17-49. <https://doi.org/10.1007/s11090-013-9436-x>.
- Kim DS and Park YS. 2011. A basic study of plasma reactor of dielectric barrier discharge for the water treatment. *J Environ Sci Int* 20, 623-630. <https://doi.org/10.5322/>

- JES.2011.20.5.623.
- Kim ES. 2010. Oral antimicrobial therapy. *Korean J Med* 78, 575-578.
- Kim JH, Park CK, Kim MY and Ahn SG. 2008. Contamination of veterinary antibiotics and antimicrobials in Han River basin. *J Korean Soc Environ Anal* 11, 109-118.
- Kim KY, Paik NW, Kim YH and Yoo KH. 2018. Bactericidal efficacy of non-thermal DBD plasma on *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *J Korean Soc Occupat Environ Hyg* 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. *J Fish Pathol* 33, 91-95. <https://doi.org/10.7847/jfp.2020.33.1.091>.
- Lee JS and Kim DY. 2006. The current status and future directions of Korean inland freshwater aquaculture. *J Fish Bus Admin* 37, 1-24.
- Locke BR, Sato M, Sunka P, Hoffmann MR and Chang JS. 2006. Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment. *Ind Eng Chem Res* 45, 882-905. <https://doi.org/10.1021/ie050981u>.
- Lou J, Lu N, Li J, Wang T and Wu Y. 2012. Remediation of chloramphenicol-contaminated soil by atmospheric pressure dielectric barrier discharge. *Chem Eng J* 180, 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.11.013>.
- Magureanu M, Piroi D, Mandache NB, David V, Medvedovici A, Bradu C and Parvulescu VI. 2011. Degradation of antibiotics in water by non-thermal plasma treatment. *Water Res* 45, 3407-3416. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.057>.
- MOMAF (Munistry if Oceans and Fisheries). 2016. Statistic Database for Fisheries Production. Retrieved from <https://www.fips.go.kr/p/S020305/#> on Jul 4, 2022.
- Nguyen PTT, Nguyen HT, Tran UNP and Bui HM 2021. Removal of antibiotics from real hospital wastewater by cold plasma technique. *J Chem* 2021, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2021/9981738>.
- Park DH. 2018. A comparative analysis on economic viability of rainbow trout aquaculture by farming method. M.S. Thesis, Pukyong National Universtiy, Busan, Korea.
- Park YS. 2013. Phenol removal using oxygen-plasma discharge in the water. *J Environ Sci Int* 22, 915-923. <https://doi.org/10.5322/JESI.2013.22.7.915>.
- Reyes AT. 2018. Outbreak investigation of *Aeromonas hydrophila* in tilapia grow-out farms. *IJBPAS* 7, 1464-1473. <https://doi.org/10.31032/IJBPAS/2018/7.8.4493>.
- Ryu YH, Uhm HS, Park GS and Choi EH. 2013. Sterilization of *neurospora crassa* by noncontacted low temperature atmospheric pressure surface discharged plasma with dielectric barrier structure. *Korean J Vacuum Soc* 22, 55-65. <https://doi.org/10.5757/JKVS.2013.22.2.55>.
- Sato M, Tokutake T, Ohshima T and Sugiarto AT. 2008. Aqueous phenol decomposition by pulsed discharge on the water surface. In: Conference Record of the 2005 Industry Applications Conferences 2895-2899. <https://doi.org/10.1109/IAS.2005.1518870>.
- Shin GW, Choi SK, Kim SK, Zhu Q, Weon KG and Lee SI. 2019. Characteristics of phenol degradation by suing underwater dielectric barrier discharge plasma. *J Korean Soc Water Wastewater* 33, 243-250. <https://doi.org/10.11001/jksww.2019.33.4.243>.
- Stratton GR, Bellona CL, Dai F, Holsen TM and Thagard SM. 2015. Plasma-based water treatment: Conception and application of a new general principle for reactor design. *Chem Eng J* 273, 543-550. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.059>.
- Yao X, Guo JS and Zhang YT. 2022. Unveiling pathways of oxytetracycline degradation induced by cold atmospheric plasma. *AIP Advances* 12, 1-10. <https://doi.org/10.1063/5.0085605>.
- You JH, Lee JH, Mun SH, Kwon SR, Park TS and Kwon JY. 2020. Disinfection effect of corona discharged plasma water on fish pathogens. *J Fish Pathol* 33, 63-69. <https://doi.org/10.7847/jfp.2020.33.1.063>.
- Xu T and Zhang XH. 2014. *Edwardsiella tarda*: An intriguing problem in aquaculture. *Aquaculture* 431, 129-135. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.12.001>.
- 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://doi.org/10.3390/plasma1020025>.