

TECHNICAL NOTE

플라즈마 공정을 이용한 동물성 플랑크톤 *Artemia* sp. 불활성화

김동석 · 박영식^{1)*}

대구가톨릭대학교 보건 안전학과, ¹⁾대구대학교 자유전공학부

Inactivation of Zooplankton *Artemia* sp. Using Plasma Process

Dong-Seog Kim, Young-Seek Park^{1)*}

Department of Health and Safety, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 38430, Korea

¹⁾Division of Liberal Studies, Daegu University, Gyeongbuk 38453, Korea

Abstract

This study aims to inactivate *Artemia* sp. (Zooplankton) in ballast water through the dielectric barrier discharge (DBD) plasma process. The DBD plasma process has the advantage of enabling direct electric discharge in water and utilizing chemically active species generated by the plasma reaction. The experimental conditions for plasma reaction are as follows: high voltage of 9-22 kV, plasma reaction time of 15-600 s, and air flow rate of 0.5-5.5 L/min. The results showed that the optimal experimental conditions for *Artemia* sp inactivation were 16 kV, 60 s, 2.5 L/min, respectively. The concentrations of total residual oxidants and ozone generated by plasma reaction increased with an increase of in voltage and reaction time, and the concentration of generated air did not increase above a certain amount.

Key words : *Artemia* sp. inactivation, Dielectric barrier discharge (DBD) plasma, Ozone, Total residual oxidants, Zooplankton

1. 서론

1988년 캐나다의 오대호에서 해양 생물종의 침입을 최초로 보고한 이후, 여러 나라에서 외래 생물종에 의한 피해가 발생하였다. 이에 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 선박평형수(Ballast water)의 이동과 피해에 대한 문제를 논의하기 시작하였다(Park and Kim, 2004). 국제해사기구는 환경피해를 방지하고자 밸러스트수와 침전물 관리에 관한 국제협약을 2004년에 채택하였고, 이 협약은 2009년에 발효되었다(Lee et al., 2010). 이에 따라 밸러스트수 처리시스템의 설치가 2012년부터 인도되는 선박에 의무화되고 2017년까지 기존의 모든 선박

으로 확대되었다(IMO, 2019; Sayinli et al., 2022).

현재 선박평형수 처리에 사용되거나 연구되고 있는 공정 기술은 크게 고체-액체 분리과 소독 공정의 두 가지 유형으로 나뉜다. 고체-액체 분리 공정은 큰 부유 미생물을 포함하여 단순히 부유 고형물을 분리하는 공정인데, 선박평형수에서는 주로 침강, 표면 여과에 의해 고형물을 분리한다(Baek et al., 2019; Lloyd's Register Marine, 2022).

소독 공정은 세균의 세포막 또는 핵산 등의 유기 구조를 파괴하는 소독제를 이용하는 산화성 살생물제, 또는 미생물의 생식, 신경, 또는 생물의 신진대사 기능을 방해하는 비산화성 살생물제를 이용한 화학적 불활성화나 UV 광, 열 또는 캐비테이션 등의 처리를 통해 미생

Received 7 February, 2023; Revised 3 March, 2023;

Accepted 4 March, 2023

*Corresponding author : Young-Seek Park, Division of Liberal Studies, Daegu University, Gyeongbuk 38453, Korea
Phone : +82-53-850-4571
E-mail : ysparkk@daegu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

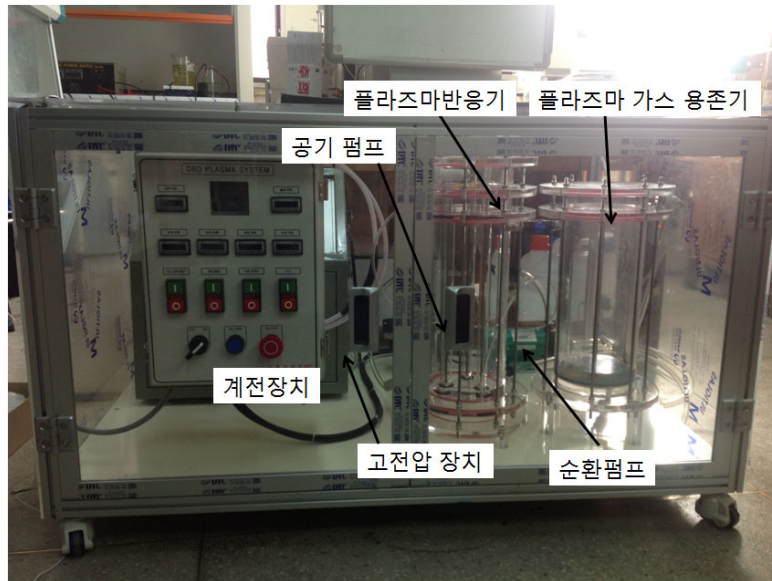


Fig. 1. Photograph of plasma reactor system.

물의 물리화학적 불활성화 및 탈산소화를 통해 미생물을 질식시키는 공정 등으로 나눌 수 있다(Lloyd's Register Marine, 2022).

이들 공정 중 산화성 살생물제를 이용하는 공정이 가장 많이 연구되었고, 현장에 적용되고 있는데, 산화성 살생물제 공정 중 염소, 이산화염소, 과산화수소, hypochlorite 등 산화제를 직접 주입하는 공정(Sano et al., 2004; Zhou et al., 2014), 오존, 전기분해 공정 등 산화제를 선상에서 바로 생성시켜 이용하는 공정 등이 있다(Nanayakkara et al., 2011).

최근 선박평형수 처리를 위해 펄스 코로나 방전(Pulsed corona discharges), 무성 방전(Dielectric barrier discharges), 전기분해(Electrolysis) 등의 방전 기술이 선박평형수 처리에 활용되고 있다(Muhammad et al., 2001). 기존의 전기방전 기술을 이용할 경우 해수의 전기전도도가 높기 때문에 적용이 제한된다. 폐수 처리용으로 많이 연구되고 있는 펄스 코로나 방전은 30 mS/cm에 이르는 전기전도도를 가진 해수에 적용할 경우 안정적인 방전을 유지할 수 없으므로 적용성이 떨어진다(Zhu et al., 2013). 따라서 펄스 코로나 방전은 기체 방전을 주된 형태로 하여 기상의 오염물질 제거에 주로 이용되며, 액체의 전기전도도와 관계없이 방전할 수 있는 무성방전이 선박평형수처리에 이용될 수 있다

(Balakrishnana et al., 2002).

무성방전 원리를 이용하는 유전체장벽 플라즈마 공정은 유전체장벽을 이용하므로 처리수 내에 직접적으로 전기방전이 가능하며, 플라즈마 반응에 의하여 생성되는 화학적 활성종들을 활용하므로 소규모 장치로 대용량 처리에 적용될 수 있는 장점이 있다(Wright et al., 2010).

본 연구에서는 플라즈마 시스템의 성능을 시험하고 최적 운전조건을 도출하기 위한 기초자료를 얻기 위해 동물성 플랑크톤의 불활성화와 기체상 오존 발생에 미치는 주요 운전변수의 영향을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 플라즈마 불활성화 시스템

유전체장벽 플라즈마 불활성화 시스템은 크게 계전장치와 고전압장치, 플라즈마가 발생하는 플라즈마 발생기, 불활성화 반응조인 플라즈마 가스 용존기로 구성되어 있다. Fig. 1에 플라즈마 시스템의 사진을 나타내었다. 플라즈마 반응기는 반응부피가 5 L이며, 플라즈마가 발생하는 모듈을 원형 아크릴 반응기 중앙에 설치하였다. 플라즈마 발생 모듈은 유전체(석영관; 외경, 20 mm; 내경, 17 mm)와 방전 전극(티타늄 봉; 직경, 4

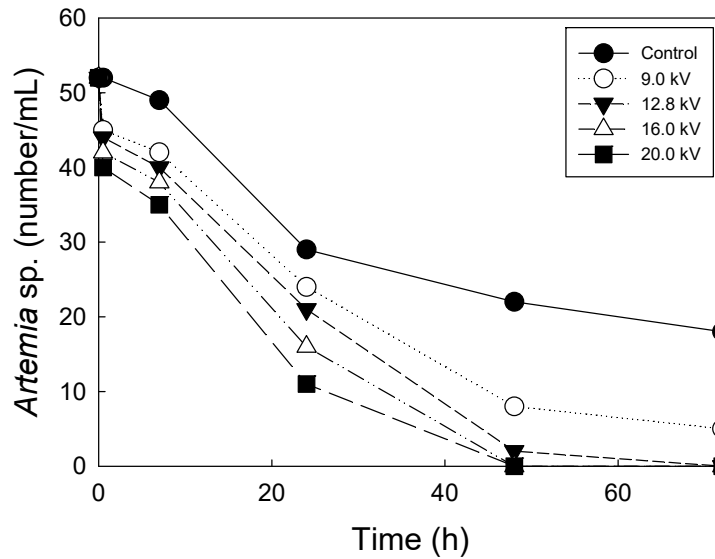


Fig. 2. Effect of high voltage on *Artemia* sp. inactivation of air plasma.

mm)으로 이루어져 있다. 본 실험에서는 플라즈마 발생 모듈 1조를 장착하였다. *Artemia* sp. 불활성화는 5 L 규모의 플라즈마 가스 용존기에서 이루어졌으며, 공기 펌프를 이용하여 공기를 플라즈마 반응기로 유입시켜 고전압을 인가하여 플라즈마를 발생시킨 후 플라즈마 가스 용존기로 플라즈마 가스를 유입하여 불활성화 실험에 이용하였다. 본 연구에서는 Fig. 1의 플라즈마 시스템에서 안전을 고려하여 플라즈마 반응기와 플라즈마 가스 용존기를 후드에 투입한 후 실험하였다.

2.2. 분석 및 측정

2.2.1. *Artemia* sp. 배양 및 계수

시험수 저장탱크(38 L)에 *Artemia* sp. 알 15 g을 해수 농도(NaCl, 30 g/L)에 맞춘 시험수 22 L에 투입하고 48 시간 동안 배양하였다. 20 W의 LED 조명등을 점등한 상태에서 공기 펌프로 공기를 공급하여 DO 농도를 4 mg/L로 유지하였다. 히터(Periha HE-50W, 챔미전기)를 사용하여 시험수 저장탱크의 수온을 25°C로 유지하면서 배양하였다. 배양 이틀 후 미부화된 알을 제거한 후, 부화된 *Artemia* sp. 용액에서 시험수 1 mL를 채취하고 시험전 *Artemia* sp.의 개체수를 측정하였다(Zheng et al., 2017).

플라즈마 반응기에서 불활성화 실험 후 5일 간 암실

에서 25°C로 보존하여 매일 *Artemia* sp.의 운동성을 근거로 하여 생사판별을 하여 개체수를 측정하였다. 생사판별은 눈으로 관찰시 *Artemia* sp.의 움직임이 거의 없는 경우 몸체가 온전한 형태인 *Artemia* sp.만 골라서 5초 이상 움직임이 없을 때 추가적으로 뾰족한 침으로 자극하여 반응이 없으면 죽은 것으로 판단하였다(Kang et al., 2007).

2.2.2. TRO와 오존 농도 측정

수중에 존재하는 총잔류산화제인 TRO (Total Residual Oxidants) 농도는 수질분석기(DR2800, HACH)를 이용하여 측정하였다. TRO는 DPD (N,N-diethyl-p-phenylenediamine)을 spectrophotometric method (US EPA method 316)에 의거 530 nm에서 Br₂로 정량하였다. 정량범위는 0-4.5 mg/L이며 정량한계는 0.02 mg/L이었다. O₃ 농도는 Indigo법을 이용하여 측정하였다(Kim and Park, 2021).

3. 결과 및 고찰

3.1. 운전인자에 따른 *Artemia* sp. 불활성화 성능 고찰

플라즈마 발생을 위해 플라즈마 모듈에 가하는 고전압을 변경하여 고전압 변화에 따른 *Artemia* sp.의 개

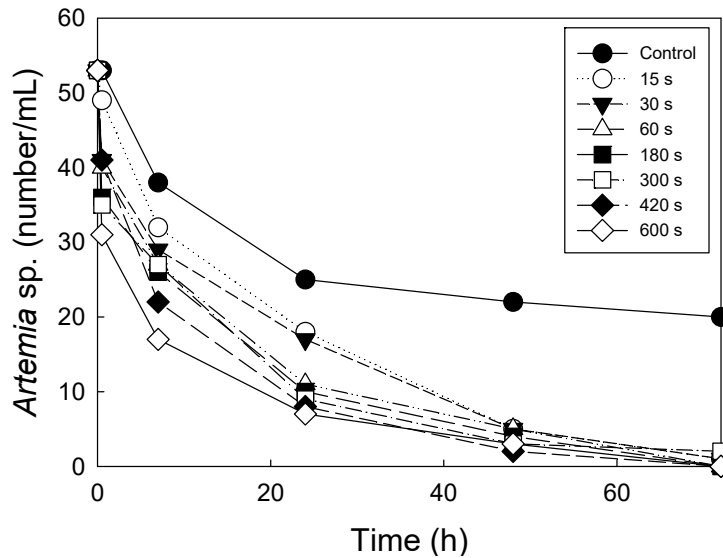


Fig. 3. Effect of reaction time on *Artemia* sp. inactivation of air plasma.

체수 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 플라즈마 가스 유량 2.5 L/min, 플라즈마 반응시간 180초인 조건에서 Fig. 2에서 보듯이 플라즈마 처리를 하지 않은 조건 (Control)에서도 초기 52 number/mL에서 72시간 후 18 number/mL로 65%의 *Artemia* sp.가 자연 사멸하는 것으로 나타났다. 그러나 10일간 *Artemia* sp.를 계수해 본 결과 70% 이상 사멸하지는 않고 남아 있는 것으로 나타났다(Data not shown).

고전압이 9.0 kV에서는 *Artemia* sp.의 완전 처리가 어려웠고, 고전압이 증가하면 초기 반응속도가 다소 증가하고 모든 *Artemia* sp.가 사멸되는 시간도 짧아지는 것으로 나타났다. 12.8 kV에서 100% 불활성화에 소요되는 시간은 72시간, 16과 20 kV에서 48시간으로 나타났다. 전력이 가장 높은 20 kV의 초기 사멸속도가 가장 빠른 것으로 나타났으나 전력과 100% 불활성화에 소요되는 시간을 같이 고려한 최적 kV는 16 kV인 것으로 판단되어 다음 실험부터는 16 kV에서 실험하였다. 이때 플라즈마 공정을 16 kV로 운전하기 위해서는 672 W의 전력이 플라즈마 전원에 필요한 것으로 나타났다.

Fig. 3에 플라즈마 고전압을 16 kV, 플라즈마 가스 유량을 2.5 L/min으로 고정한 조건에서 플라즈마 가스의 반응시간에 따른 *Artemia* sp. 개체수 변화를 나타내었다. Fig. 3에서 보듯이 반응시간이 증가할수록 초기 사멸속도는 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 시간

이 경과할수록 반응시간에 따른 *Artemia* sp. 개체수 차이는 적어졌으며, 60초 이상의 반응시간에서는 반응시간의 증가에 따라 초기 사멸속도가 증가하지만 24시간 이상에서의 잔류 *Artemia* sp. 개체수가 거의 비슷하게 나타나 최적 반응시간은 60초라고 판단되었다.

Fig. 4에 플라즈마 고전압을 16 kV, 반응시간을 60 초로 고정한 조건에서 플라즈마 가스 유량이 *Artemia* sp. 개체수에 미치는 영향을 나타내었다. 플라즈마 반응에 의해 발생하는 이온화 가스는 유입되는 플라즈마 가스 유량이 낮은 조건에서는 고농도의 플라즈마 가스가 소량 생성되고, 플라즈마 가스 유량이 많은 경우 저농도의 플라즈마 가스가 다량 발생된다.

Fig. 4에서 보듯이 플라즈마 가스 유량이 가장 낮은 0.5 L/min의 경우 *Artemia* sp. 불활성화가 가장 낮았으며, 플라즈마 가스 유량이 2.5 L/min으로 증가할 때까지 *Artemia* sp. 불활성화가 증가하는 것으로 나타났다. 2.5 L/min 이상의 플라즈마 가스 유량에서는 플라즈마 가스 유량의 증가에 따라 불활성화가 증가하였으나 그 차이는 무시할 정도로 작았다. 일정 유량 이상의 플라즈마 가스 유량에서는 플라즈마 가스 유량의 변화는 플라즈마의 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 최적 플라즈마 가스 유량은 2.5 L/min으로 판단되었다. 플라즈마 가스 유량에 따른 플라즈마의 성능은 플라즈마 생성에 직접적인 영향을 주는 고전압이

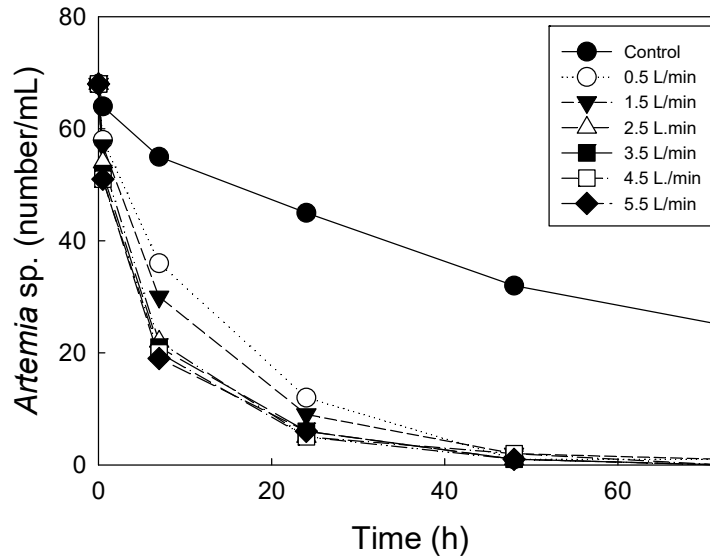


Fig. 4. Effect of plasma gas flow rate on *Artemia* sp. inactivation of air plasma.

나 플라즈마 반응 시간과는 다르게 제한적으로 영향을 주는 것으로 판단되었다.

3.2. 운전인자에 따른 TRO 생성 특성

TRO는 선박평형수의 살균 및 중화·배출의 기준이 되는 인자이므로 수중의 TRO 농도가 높으면 미생물의 불활성화에 이용되는 산화제의 농도가 높다는 것을 의미한다(Kwon et al., 2016).

플라즈마 공정에서 운전인자에 따른 생성 TRO 농도를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 반응시간 180초에서 플라즈마의 고전압에 따른 생성 TRO 농도를 나타내었다. 생성되는 TRO 농도는 고전압의 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 9 kV에서는 0.10 mg/L의 TRO가 생성되었고, 가장 높은 고전압인 22 kV에서 TRO 농도는 1.41 mg/L로 나타났다.

Fig. 5(b)에 고전압이 16 kV, 플라즈마 가스 유량이 2.5 L/min인 조건에서 플라즈마 반응시간에 따른 TRO 생성 농도를 나타내었다. 동일한 고전압에서 반응시간의 증가에 따라 생성 TRO 농도는 선형적으로 증가하여 600초의 반응시간에서 2.32 mg/L로 증가하였다.

60초의 반응시간에서 생성 TRO 농도는 0.23 mg/L, 600초의 2.32 mg/L이었다. 60초의 경우 전력량이 0.45 Wh, 600초의 경우 4.77 Wh으로 전력량은

10.5배 차이이며, TRO생성 농도차이는 10.1배로 나타나 반응시간에 따른 전력량 차이는 TRO 생성 농도와 거의 같은 경향을 나타내었다.

Fig. 3의 잔류 *Artemia* sp. 개체수 결과와 비교하면 초기의 반응시간에 따른 사멸 *Artemia* sp. 증가는 TRO 농도의 증가와 관련이 있는 것으로 나타났다. 그러나 반응 후 24시간부터 반응시간에 따른 잔류 개체수 차이는 줄어들고 48시간에는 큰 차이를 보이지 않는 것은 많은 개체가 반응 초기에 산화제로 인해 사멸되었으며, 반응이 끝나더라도 잔류 산화제가 남아있기 때문에 이들 산화제의 작용으로 지속적으로 살균작용이 발생하여 차이가 적어진다고 판단되었다. 또한 플라즈마에서 발생하는 산화제는 총잔여산화제를 의미하는 TRO [수중의 염소, 브롬, 오존, OH· 등의 산화제와 관련이 있음(Jung et al., 2013)]외의 다른 산화제나 UV와 같은 작용도 같이 발생하기 때문에 TRO 농도만으로는 설명이 충분하지 않다고 판단되었다.

Fig. 5(c)에 고전압이 16 kV, 시간이 60초인 조건에서 플라즈마 가스 유량에 따른 생성 TRO 농도를 나타내었다. TRO 농도는 플라즈마 가스 유량의 증가에 따라 증가하여 0.5 L/min에서는 0.1 mg/L의 TRO가 생성되었으며, 2.5 L/min에서는 0.22 mg/L로 증가한 후 그 이상의 플라즈마 가스 유량에서는 플라즈마 가스 유

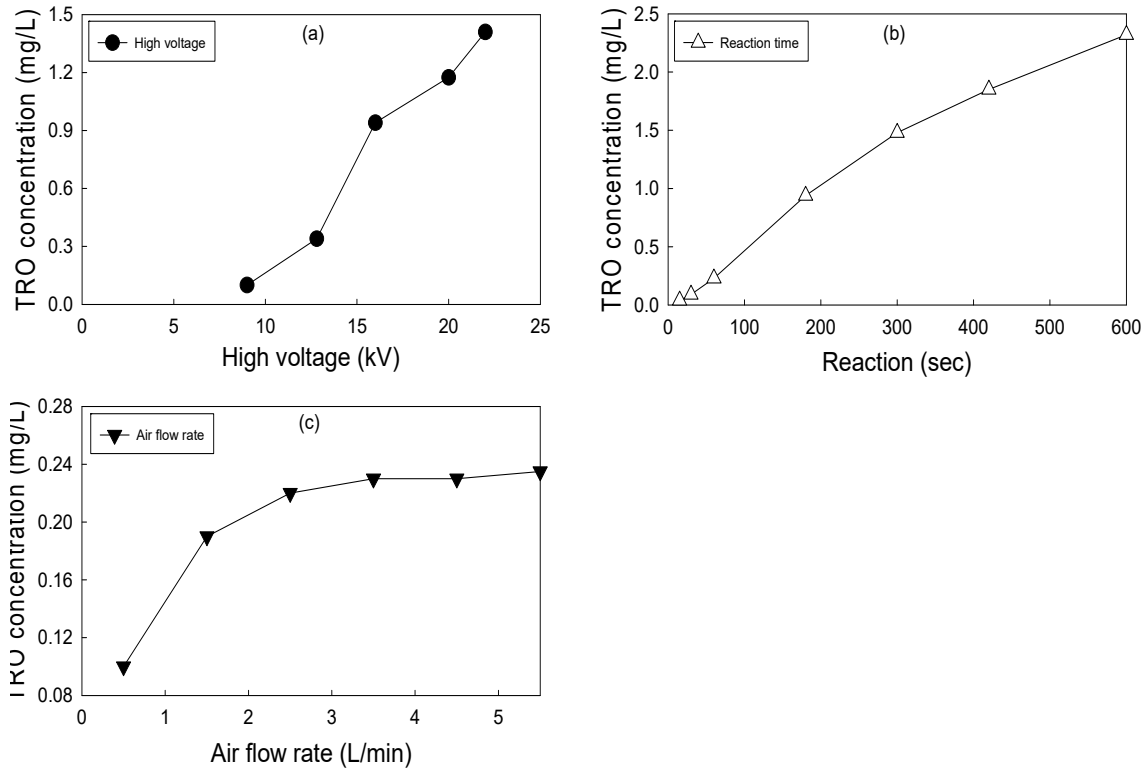


Fig. 5. Effect of operation parameter on TRO generation of air plasma process. (a) high voltage, (b) reaction time (c) plasma gas flow rate

량의 증가에 따른 생성 TRO 농도가 일정해지는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4의 *Artemia* sp. 불활성화 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

3.3. 운전인자에 따른 오존 생성 특성

유전체장벽 방전 플라즈마 공정은 무성 방전원리를 이용한 오존발생기와 원리가 같기 때문에 생성되는 플라즈마 가스 중 존재하는 산화제에서 오존이 농도가 가장 높은 것으로 알려져 있다(Shi et al., 2009). 따라서 플라즈마 반응에 의해 생성되는 오존 농도를 고찰하기 위하여 운전인자에 따른 생성 오존 농도를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 플라즈마 가스 유량이 2.5 L/min, 반응시간이 180초인 조건에서 플라즈마의 고전압에 따른 생성 오존 농도를 나타내었다. 생성되는 오존 농도는 고전압의 증가에 따라 직선적으로 증가하였다. 9 kV에서는 오존이 거의 발생하지 않았으며, 가장 높은 고전압인 22 kV에서도 오존 농도는 0.065 mg/L

로 나타났다.

Fig. 6(b)에 고전압이 16 kV, 플라즈마 가스 유량이 2.5 L/min인 조건에서 반응시간에 따른 오존 농도를 나타내었다. 동일한 고전압에서 반응시간의 증가에 따라 생성 오존 농도는 선형적으로 증가하여 600초의 반응시간에서 0.092 mg/L로 증가하였으며, Fig. 6(b)의 반응시간에 따른 TRO 생성 경향과 거의 유사한 직선으로 나타났다.

Fig. 6(c)에 고전압이 16 kV, 반응시간이 60초인 조건에서 생성되는 오존 농도를 나타내었다. TRO 농도는 플라즈마 가스 유량이 0.5 L/min에서는 0.01 mg/L, 1.5 L/min에서는 0.02 mg/L, 2.5 L/min 이상의 플라즈마 가스 유량에서는 0.03 mg/L로 일정하게 나타났다.

Fig. 5의 TRO 생성과 Fig. 6의 오존 생성은 고전압과 플라즈마 반응시간 증가에 따라 직선적으로 증가하는 경향과 최적 플라즈마 가스 유량이 존재하는 점에서 거의 같은 것으로 나타났다.

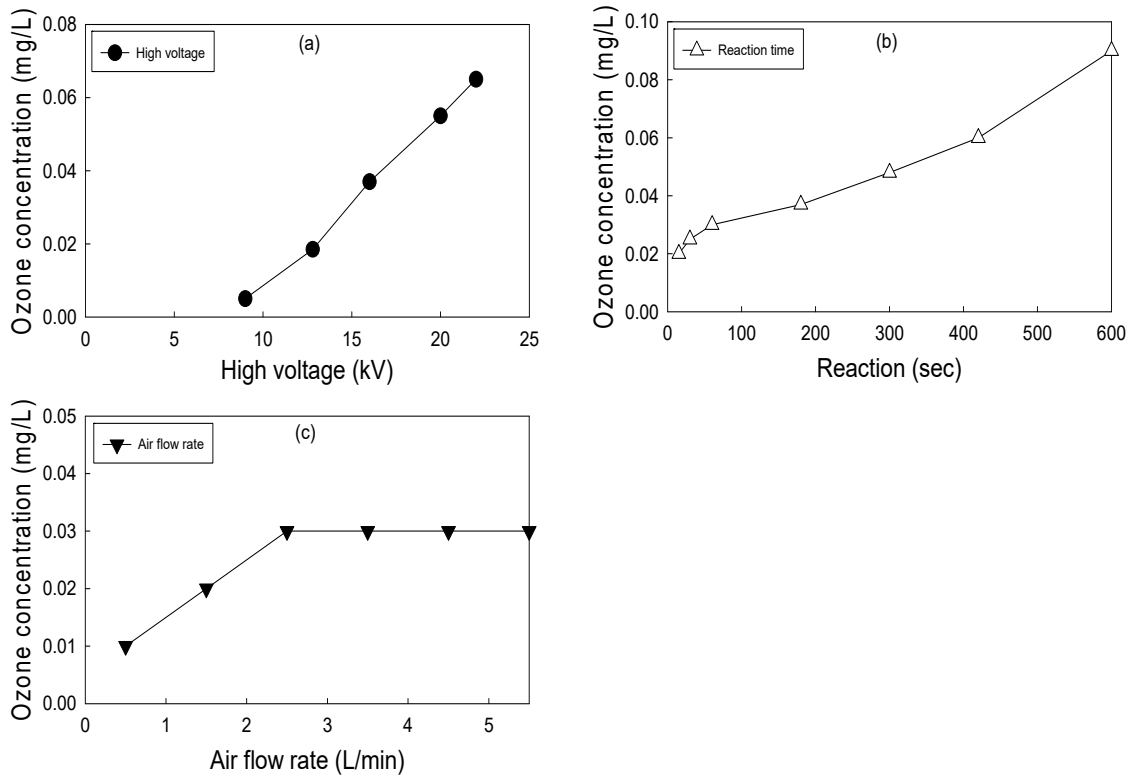


Fig. 6. Effect of operation parameter on ozone generation of air plasma process with (a) high voltage, (b) reaction time (c) plasma gas flow rate.

4. 결론

선박평형수에 존재하는 동물성 플랑크톤의 불활성화와 플라즈마 가스에서 발생하는 총잔류산화제(TRO)와 오존 발생에 미치는 주요 운전변수의 영향을 고찰하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 12.8 kV의 고전압에서 100% 불활성화에 소요되는 시간이 72시간, 16과 20 kV에서 48시간으로 나타나 전력을 고려한 최적 고전압은 16 kV인 것으로 나타났다.
- 2) 플라즈마 고전압 16 kV, 공기량 2.5 L/min인 조건에서 반응시간이 증가할수록 초기 사멸속도는 증가하는 것으로 나타났지만, 반응시간에 따른 *Artemia* sp. 개체수 차이는 적어졌으며, 60초 이상의 반응시간에서는 반응시간의 증가에 따라 초기 사멸속도가 증가하지만 24시간 이상에서의 잔류 *Artemia* sp. 개체수가 거의 비슷하게 나타나

최적 반응시간은 60초라고 판단되었다.

- 3) 일정 유량 이상의 플라즈마 가스 유량에서는 플라즈마 가스 유량의 변화는 플라즈마의 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 최적 플라즈마 가스 유량은 2.5 L/min으로 판단되었다.
- 4) 고전압과 플라즈마 반응시간이 증가함에 따라서 생성되는 TRO와 오존 농도는 직선적으로 증가하였으며, TRO와 오존 농도에 대한 최적 플라즈마 가스 유량이 존재하였다.

REFERENCES

- Baek, J. T., Hong, J. H., Tayyab, M., Kim, D. W., Jeon, P. R., Lee, C. H., 2019, Continuous bubble reactor using carbon dioxide and its mixtures for ballast water treatment, *Water Res.*, 154, 316-326.
- Balakrishnana, P. A., Arunagiria, A., Raob, P. G., 2002, Ozone generation by silent electric discharge and its

- application in tertiary treatment of tannery effluent, *J. Electrostat.*, 56, 77-86.
- Carbona, S. L., Viitasalo-Frösen, S., Masson, D., Sassi, J., Pineau, S., Lehtiniemi, M., Corroler, D., 2010, Efficacy and environmental acceptability of two ballast water treatment chemicals and a alaylamine based-biocide, *Sci. Total Environ.*, 409, 247-255.
- Cha, H. G., Seo, M. H., Lee, H. Y., Lee, J. H., Lee, D. S., Shin, K. S., Choi, K. H., 2015, Enhancing the efficacy of electrolytic chlorination for ballast water treatment by adding carbon dioxide, *Mar. Pollut. Bull.*, 95, 315-323.
- de Lafontaine, Y., Despatie, S. P., 2014, Performance of a biological deoxygenation process for ships' ballast water treatment under very cold water conditions, *Sci. Total Environ.*, 472, 1036-1043.
- Feng, D., Shi, J., Sun, D., 2015, Inactivation of microalgae in ballast water with pulse intense light treatment, *Mar. Pollut. Bull.*, 90, 299-303.
- Feng, D., Xu, S., Liu, G., 2015, Application of immobilized TiO₂ photocatalysis to improve the inactivation of *Heterosigma akashiwo* in ballast water by intense pulsed light, *Chemosphere*, 125, 102-107.
- Gregg, M. D., Gustaaf, M., Hallegraef, G. M., 2007, Efficacy of three commercially available ballast water biocides against vegetative microalgae, dinoflagellate cysts and bacteria, *Harmful Algae*, 6, 567-584.
- IMO, 2019, List of ballast water management systems that make use of active substances which received basic and final approval, *BWM.2/Circ.34/Rev.7*, London, IMO.
- Kang, J. H., Shin, K. S., Hyun, B. G., Jang, M. C., Kim, E. C., Chang, M., 2007, The electrochemical chlorination for marine plankton community disinfection, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, 10, 127-137.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2021, Zooplankton removal in seawater using UV, electrolysis and UV+electrolysis process, *J. Environ. Sci. Int.*, 30, 501-508.
- Kwon, J. H., Lim, H. J., Lee, G. H., Lee, H. D., Kim, D. W., 2016, Feasibility study on Potassium Iodide (KI) sensor for measuring total residual oxidant in ballast water, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 38, 596-602.
- Lee, H. D., Kim, J. O., Jung, J. W., 2010, Effects of operating parameters on ozone production by plasma gun for ballast water treatment, *J. Navi. Port Res.*, 34, 205-211.
- Lloyd's Register Marine, 2022, Understanding ballast water management: Guidance for ship owners and operators, www.lr.org/bwm.
- Nanayakkara, K. G. N., Zheng, Y. M., Alam, A. K. M. K., Zou, S., Chen, J. P., 2011, Electrochemical disinfection for ballast water management: technology development and risk assessment, *Mar. Pollut. Bull.*, 63, 119-123.
- Park, S. H., Kim, I. S., 2004, Disinfection of harmful organisms for sea water using electrolytic treatment system, *J. Korean Navi. Port Res.*, 28, 955-960.
- Sano, L. L., Mapili, M. A., Krueger, A., Garcia, E., Gossiaux, D., Phillips, K., Landrum, P. F., 2004, Comparative efficacy of potential chemical disinfectants for treating unballasted vessels, *J. Great Lake Res.*, 30, 201-216.
- Sayinli, G. B., Dong, Y., Park, Y., Bhatnagar, A., Sillanpa, M., 2022, Recent progress and challenges facing ballast water treatment - A review, *Chemosphere*, 291, 1-23.
- Shi, J., Bian, W., Yin, X., 2009, Organic contaminants removal by the technique of pulsed high-voltage discharge in water, *J. Hazard. Mater.*, 171, 924-931.
- Zheng, C., Kim, D. S., Park, Y. S., 2017, Disinfection models to predict inactivation of *Artemia* sp. via physicochemical treatment processes, *J. Environ. Sci. Int.*, 26, 345-362.
- Zhou, S., Shao, Y., Gao, N., Li, L., Deng, J., Zhu, M., Zhu, S., 2014, Effect of chlorine dioxide on cyanobacterial cell integrity, toxin degradation and disinfection by-product formation, *Sci. Total Environ.*, 482, 208-213.
- Zhu, L., He, Z. H., Li, P., Xu, T. S., Zhao, H., Zhang, X. F., Gao, Z. W., 2013, The research on the pulsed arc electrohydraulic discharge and its application in treatment of the ballast water, *J. Electrostat.*, 71, 728-733.
-
- Professor. Dong-Seog Kim
Department of Health and Safety, Catholic University of Daegu
kimds@cu.ac.kr
 - Professor. Young-Seek Park
Division of Liberal Studies, Daegu University
ysparkk@daegu.ac.kr