Journal of Environmental Science International
30(7); 597~604; July 2021

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2021.30.7.597

TECHNICAL NOTE

UV, 전기분해 및 UV+전기분해 공정을 이용한 해수 중의 동물성 플랑크톤 제거

김동석 · 박영식[1)*]

대구가톨릭대학교 환경과학과, [1)]대구대학교 자유전공학부

Zooplankton Removal in Seawater using UV, Electrolysis and UV+electrolysis Process

Dong-Seog Kim, Young-Seek Park[1)*]

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 37430, Korea

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

Abstract

The International Maritime Organization (IMO) ballast water management agreement (International Convention for the Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediments) came into force on September 8, 2017. This study evaluated the disinfection performance of electrolysis, UV treatment, and electrolysis + UV combined, to improve the treatment of zooplankton (size ≥ 50 μm), which is expected to strengthen the standards for biodegradation efficiency. Among the methods used, the disinfection time leading to 100% death was in the order: electrolysis > electrolysis + UV > UV process. For the same level of disinfection performance, the amount of electricity required for the electrolysis, UV, and electrolysis + UV processes were 1,300 W.s, 8,400 W.S, and 4,500 W.s, respectively. The combination of electrolysis + UV process for inactivation of zooplankton in ballast water did not show a synergic effect owing to the slow disinfection time and high power consumption.

Key words : UV, Electrolysis, UV+electrolysis, Zooplankton inactivation, Total residual oxidants

1. 서 론

선박은 매년 30억에서 50억톤의 선박평형수를 전 세계적으로 이동시킨다. 선박평형수는 안전하고 효율적인 해양 운송에 필수적이지만, 평형수와 함께 유입된 유해 수중생물들은 해양생태계를 교란시킬 수 있고, 해당 지역에 경제적, 환경적 피해를 유발할 수도 있다(Korea Maritime Research Institute, 2017).

국제연합(UN) 산하 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)은 선박평형수에 의한 외래종 유입을 막기 위해 2004년에 '선박평형수관리협약'을 채택하여, 선박평형수 처리 장비를 설치하고, 배출기준에 부합하도록 요구하고 있다(IMO, 2004). 협약이후 13년이 지난 2017년부터 선박평형수에 대한 법안이 발효됨에 따라 2017년 9월8일 이전에 건조된 총톤수 400톤 이상의 대부분의 국제항해 선박은 관련 설비를 선박에

Received 5 May, 2021; **Revised** 1 June, 2021;
Accepted 17 June, 2021
***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.

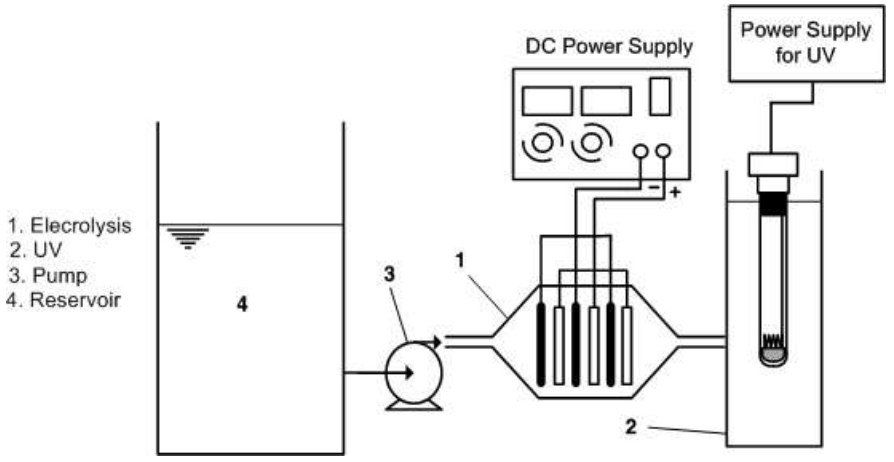

Fig. 1. Schematic diagram of electrolysis + UV complex disinfection process.

설치하여야 한다(Korea Maritime Research Institute, 2017).

세계 각국에서는 수십 조에 이르는 선박평형수 처리 시장을 선점하기 위하여 다양한 물리적 처리기술과 화학적 처리기술을 개발하여왔다. 2016년 10월을 기준으로 국제해사기구(IMO)에서 최종 승인한 선박평형수 처리 기술은 41가지(IMO, 2017)에 이른다. 이들 기술 중 전기분해 공정이 가장 많이 이용하고 있으며, 자외선(UV) 소독도 적용되고 있다(Werschkun et al., 2012).

본 연구에서는 향후 생물 사멸효율에 대한 기준 강화가 예상되는 크기가 50 μm 이상인 동물성 플랑크톤 처리능의 향상을 위하여 전기분해, UV소독 및 전기분해+UV 복합공정에서의 해수 동물성 플랑크톤인 *Artemia* sp.의 소독에 미치는 영향을 관찰하여 기존 소독 기술의 성능평가와 함께 복합공정의 적용 가능성을 조사하였다(Jung et al., 2015).

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 장치 및 실험 방법

실험에 사용한 연속식 전기분해+UV 소독장치를 Fig. 1에 나타내었으며, 전기분해 장치와 UV소독 장치의 반응기 부피는 각각 2 L이었다. 전기분해 소독장치는 전극과 전원 공급기로 구성되어 있고, 양극과 음극 모두 DSA (Dimensionally Stable Anode)으로 이루어져 있으며, 전극 1쌍을 2 mm 간격으로 4 쌍 설치하였다. UV 소독장치는 UV-C 10 W 램프를 반응기 내에 실험에 따라 1대 또는 2대 설치하였다. 연속식 단일 전기분해, UV 소독실험은 Fig. 1에서 수조-펌프-해당 장치만 연결하여 운전하였다. 전기분해+UV 통합공정 실험에서는 물 펌프에 의해 실험수를 전기분해-UV 소독장치의 순서로 통과시켜 실험하였다. 단일 전기분해 실험은 직류 전원공급기를 이용하여 직류 20 W에서 실험하였고, UV 실험은 UV-C 10 W 램프를 2대 설치하고 20 W에서 실험하였다. 전기분해 실험의 경우 10 W와 20 W의 전류와 전압은 각각 3.7 A, 2.7 V와 6.65 A 3.0 V이었다.

전기분해+UV 실험은 전기분해 10 W + UV 10 W로 실험하였다. 본 실험에 사용한 시험수는 수돗물을 사용하여 제조하였으며, 전해질은 식용 소금(NaCl 함량: 88%)을 이용하였다.

2.2. *Artemia* sp. 배양

동물성 플랑크톤은 시중에서 구하기 쉬운 *Artemia* sp.를 이용하였으며, 관상용 어류의 먹이로 판매되는 *Artemia*. sp 알(New Generation, GST)을 구매하고 배양한 후 사용하였다. 본 연구에서 배양한 *Artemia* sp.는 총 40~60 마리/mL로 설정하여 실험하였다. 시험수 저장탱크(38 L)에 *Artemia* sp.알 15 g과 22 L의 시험수(NaCl : 30 g/L)를 같이 넣고 48 시간 동안 배양하였다. 20 W의 LED 조명등을 수중에서 켜고 공기를 공급하여

DO는 4 mg/L, 수온은 25℃로 유지하였다. 이틀 후 부화하지 않은 알을 자석으로 제거한 다음 부화된 *Artemia* sp.를 충분히 혼합한 후 1 mL의 시험수를 채취하고 *Artemia.* sp 농도를 계수하였다.

2.3. 분석 및 측정

2.3.1. *Artemia* sp. 계수

선박평형수의 동물성 플랑크톤 배출기준은 반복 채취된 시료에서 최소 크기가 50 ㎛ 이상인 생물체의 생존 개체수가 m^3 당 10개 미만일 경우 배출가능하다. 처리수가 25℃로 유지되는 항온조에서 5일간 보존하면서 운동성을 근거로 한 생사를 매일 확인하며, 소독 실험후 *Artemia* sp. 계수시 부속지의 운동성을 생사판별 기준으로 하였다. 육안 관찰시 몸체가 온전한 형태의 *Artemia* sp.만 계수하며 움직임이 거의 없는 경우 5초 이상 움직임이 없을 때 뾰족한 침으로 자극하여 반응이 없으면 사멸한 것으로 판정하였다(Wright et al., 2010). 시험수 내의 살아 있는 *Artemia* sp.와 죽은 *Artemia* sp.를 모두 계수하여 처리수에서의 사멸율을 구하였다.

2.3.2. 산화제 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 Br_2로 정량하였다. 정량범위는 0-4.5 mg/L이며 정량한계는 0.02 mg/L이었다. O_3 농도는 Indigo법을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. UV와 전기분해 단일 공정의 *Artemia* sp. 불활성화 성능 고찰

Fig. 2에 전력이 20 W인 연속식 UV 소독공정에서 소독시간에 따른 *Artemia* sp.의 개체수 변화를 나타내었다. Fig. 2에서 보듯이 UV 조사시간이 증가할수록 초기 *Artemis* sp. 사멸시간이 빨라지는 것으로 나타났다. 연속식 UV 소독에서 5초의 UV 조사시간에도 48시간 후 모든 *Artemis* sp.가 사멸되는 것으로 나타났다고, 24시간 후 모든 *Artemis* sp.가 사멸되는 시간은 조사시간 30초로 나타났다.

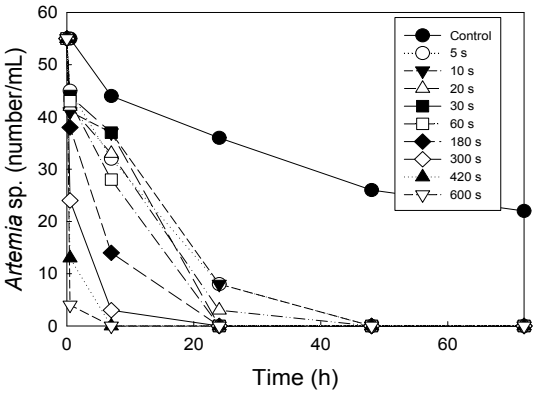

Fig. 2. Effect of reaction time on *Artemia* sp. inactivation of UV process with continuous operation mode.

20 W의 전력(6.65 A, 3.0 V)으로 실험한 연속식 전기분해 공정에서 소독시간에 따른 *Artemia* sp. 개체수 변화를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타내었듯이 전기분해 실험의 경우 5초의 전기분해 반응에서 48시간 후 모든 *Artemia* sp.가 사멸되었다. 10초 이상의 전기분해시 반응 직후의 초기 사멸속도는 빠르게 증가하는 것으로 나타났다. 나머지 반응시간의 경우 초기 사멸속도만 다를 뿐 최종 사멸에 이르는 시간이 7 시간 이내인 것으로 나타났고, 300초 이상의 반응시간에서는 반응 직후 거의 모든 *Artemia* sp.가 사멸하는 것으로 나타나 반응이 매우 빠른 것으로 나타났다. 전기분해 공정에서 빠른 *Artemia* sp. 사멸은 전기분해시 생성되는 강력한 산화제의 작용으로 반응 초기에 *Artemia* sp.가 사멸되기 때문인 것으로 판단되었다.

UV 공정과 전기분해 공정을 비교하면, 전기분해 공정의 경우 7 시간후 100% 사멸에 이르는 반응시간은 10초가 소요되고, UV 공정의 경우 420초가 소요되어 전기분해 반응의 초기 반응속도가 매우 빠른 것으로 나타나 전기분해 공정의 성능이 우수한 것으로 판명되었다. 그러나 UV 공정 20 W의 경우 소요되는 실제 전력은 UV 램프의 출력과 같은 20 W이지만 전기분해 공정의 경우 직류 20 W를 얻기 위하여 DC 전원공급기를 이용하는데 DC 전원공급기에 인가되는 실제 교류전력을 측정한 결과 130 W로 나타나 전력 소모는 전기분해 공정이 6.5배 높은 것으로 나타났다. 그러나 전기분해 공정의 소독시

간은 짧고 UV 소독 공정의 소독 기간이 길기 때문에 임의로 기준으로 정한 7시간 후 100% 제거에 필요한 전력량(W.s)을 계산한 결과 전기분해 공정은 1,300 W.s이고, UV 공정은 8,400 W.s가 필요하여 전기분해 공정의 에너지 소비가 오히려 6.46배 적은 것으로 나타났다.

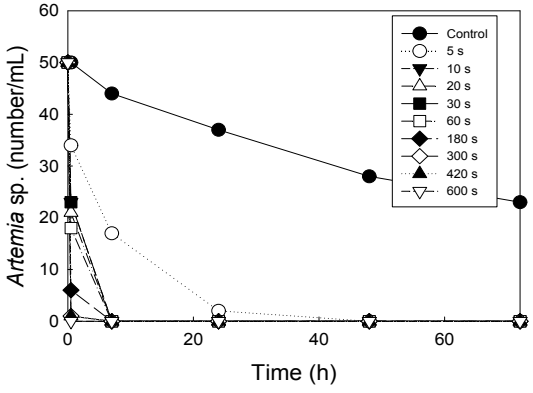

Fig. 3. Effect of reaction time on *Artemia* sp. inactivation of electrolysis process with continuous operation mode.

3.2. 전기+UV 공정의 *Artema* sp. 불활성화 성능 고찰

고농도의 염소계 산화제를 생성할 수 있는 NaCl이 다량 함유된 해수를 전기분해할 경우 전기분해 공정의 소독성능은 우수하지만, 공정의 특성상 해수의 염도와 함유물 농도에 영향을 받는다(Lacasa et al., 2013). 기수와 같은 염 농도가 낮은 경우 생성되는 산화제 농도가 낮고 따라서 소독 성능도 낮아지는 단점이 있어, 염 농도에 따라 운전 모드를 변경해주어야 한다(Kim and Park, 2019). 또한 전기분해 공정은 고농도의 산화제로 인하여 불활성화 효과가 지속되는 장점은 있지만 소독후 잔류하는 잔류산화제로 인하여 방류될 경우 환경에 영향을 줄 수 있기 때문에 소독 후 티오황산나트륨으로 중화하여 방류하게 된다(Park and Kim, 2019). 따라서 TRO (Total Residual Oxidants)라고 불리는 총잔류산화제 농도는 소독 성능과 소독 후 처리에 영향을 미치므로 적절한 농도가 필요하다.

UV 공정은 해수의 특성에 따라 불활성화 성능이 큰 영향을 받지 않으며 소독 효과가 비교적 우수하지만 잔류 불활성화 효과가 전혀 없고 암 조건에서도 활성이 살아나는 단점이 있다. 또한 3.1. 절의 실험 결과에서 보듯이 같은 전기분해 공정에 비하여 소독시간이 길고 같은 소독효과를 얻기 위한 전력량(W.s)이 전기분해 공정보다 높다는 단점이 있다. 또한 우기에 흙탕물이 섞여 탁도가 높아지는 경우 UV의 투과량 감소로 인하여 소독 성능이 감소된다. 반면 전기분해 공정은 전해질의 종류와 농도가 성능에 영향을 미치지만 전해질 농도와 관계없는 탁도 등의 인자는 소독성능에 영향을 미치지 않는다 (Kim and Park, 2019).

두 공정의 장점을 합치고 단점을 보완하기 위하여 전기분해 공정과 UV 공정을 결합하였으며, Kim and Park(2010)이 전기분해 공정과 UV 공정의 전력이 같은 조건에서 대장균 소독성능이 가장 우수하다고 보고하였기 때문에 전기분해 공정과 UV 공정의 전력을 10 W로 같게 한(총 전력 20 W) 후 전기분해+UV 연속식 공정에서 *Artemia* sp. 불활성화를 Fig. 4에 나타내었다.

단일 UV 공정인 Fig. 2, 단일 전기분해 공정인 Fig. 3 및 전기분해+UV 복합공정인 Fig. 4의 *Artemia* sp. 불활성화를 비교해보면 전기분해+UV 공정의 *Artemia* sp. 불활성화 성능은 전기분해 단독 반응보다는 초기 사멸속도가 느리고 UV 단독 반응보다는 초기 사멸속도가 빠른 것으로 나타나 두 공정의 중간 정도인 것으로 나타났다.

Fig. 5에서 보듯이 전기분해+UV 공정은 반응시간 30초까지는 UV 공정의 *Artemia* sp. 불활성화 특성과 비슷하게 나타나 전기분해 단독 반응보다는 초기 사멸속도가 느린 것으로 나타났다. 60초 이상의 반응시간에서는 전기분해 공정의 *Artemia* sp. 사멸 특성과 비슷하게 나타내었다. 7시간후 100% 사멸에 이르는 반응시간은 60초가 소요되고, 이에 소요되는 전력량을 구하면 아래와 같다.

10 W X 60 sec (UV)
+ 65 W X 60 sec (Electrolysys) = 4,500 W.s

7시간후 100% 사멸에 이르는 전기분해, UV 및 전기분해+UV 공정에 소요되는 전력량은 각각 1,300 W.s, 8,400 W.S 및 4,500 W.s로 나타나 소요 전력량은 전기분해 < 전기분해+UV < UV 공정으로 나타났다. 7시간후 100% 사멸에 이르는 소독시간은 전기분해 (10 초) < 전기분해+UV (60초) < UV (420 초)로 나타나 소독 성능과 전력량 모두 전기분해 공정이 우수한 것으로 나타났다.

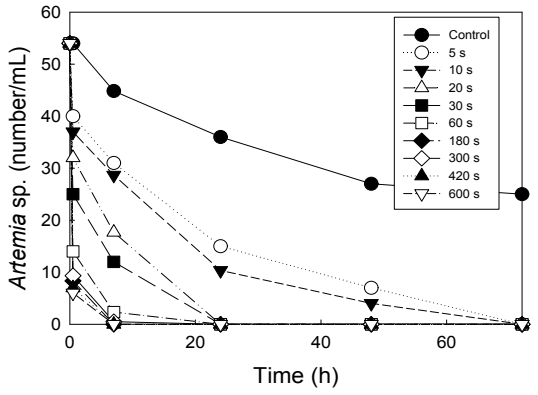

Fig. 4. Effect of reaction time on *Artemia* sp. inactivation of electrolysis+UV process with continuous operation mode.

3.3. 전기, 전기+UV 공정에서 오존과 TRO 생성 특성

UV 공정은 산화제를 발생시키는 공정이 아니므로 오존과 TRO 생성농도를 측정하지 않았으며, 전기분해 공정과 전기분해+UV 공정에서 발생하는 산화제 중에서 산소계 산화제 중의 하나인 오존과 총잔류산화제 농도를 나타내는 TRO 생성농도를 비교하였다. Fig. 5에 전기분해 10 W, 20 W 및 전기분해+UV 복합공정에서 생성되는 오존 농도를 나타내었다. 전기분해 10 W 공정에서 발생하는 오존 농도를 나타낸 것은 전기분해 공정에 UV를 10 W 추가한 전기분해+UV 공정의 경우 공정의 추가로 인한 오존 농도의 변화를 비교하기 위하여 측정하였다. 그림에서 보듯이 모든 공정에서 생성되는 오존은 시간에 따라 직선적인 생성 경향을 나타내었고, 반응 600초에서 전기분해 10 W, 20 W 및 전기분해 10 W+UV 10 W 공정의 오존 농도는 각각 220, 350, 160 mg/L로 나타났다. 각 공정의 생성 오존농도를 1차식으로 회귀식을 구한 결과 전기분해 20 W에서는 기울기 값이 2.1672로 나타났고(R^2 = 0.9981), 전기분해 10 W에서는 0.9982(R^2 = 0.9982), 전기분해 10 W+UV 10 W 공정에서는 0.9121(R^2 = 0.9975)로 나타났다. 전기분해 20 W 공정의 오존 생성에 대한 기울기 값은 전기분해 10 W 공정의 약 2.17배로 전력에 따라 생성되는 오존 농도는 직선적인 관계를 나타내었다. 그리고 전기분해 10 W 공정과 전기분해+UV 복합공정의 오존 생성에 대한 기울기를 비교하면 전기분해 단일공정의 기울기가 약 1.23배 높게 나타났다. 이는 전기분해 공정에서는 NaCl로 인한 Cl_2와 같은 염소계 산화제 외, 오존과 과산화수소와 같은 산소계 산화제가 발생한다(Lee et al., 2005). 이들 오존과 과산화수소는 자외선과 반응하여 식 (1)과 같이 OH라디칼을 생성하는 것으로 알려져 있으므로 전기분해+UV 공정에서 오존 농도감소는 생성된 오존이 OH라디칼 생성에 사용되기 때문인 것으로 판단되었다(Wu et al., 2008).

$$O_3 + hv + H_2O \rightarrow 2OH\cdot + O_2 \quad (1)$$

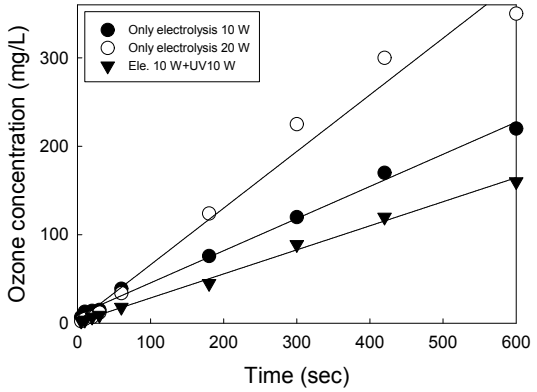

Fig. 5. Effect of reaction time on ozone generation of electrolysis (10 W), electrolysis (20 W) and electrolysis+UV process.

Fig. 6에 전기분해 단독 공정(20 W)와 전기분해+UV 공정 및 전기분해 10 W 공정에서의 총잔류산화제인 TRO 농도를 나타내었다. 전기분해 20 W 공정에서 생성되는 TRO 농도가 가장 높았으며, UV 공정에서는 산화제가 발생하지 않으므로 전기분해+UV 공정에서 생성되는 산화제 농도는 주로 전기분해 공정에서 발생하는 것이다. TRO 생성에 대한 공정 결합의 효과를 보기 위하여 전기분해 10 W+UV 10 W 공정과 생성되는 TRO 농도와 전기분해 10 W 공정에서의 TRO 농도를 비교하여 보았다. 전기분해 20 W 공정에서 600초 후 생성된 TRO 농도는 1300 mg/L, 전기분해 10 W 공정에서는 633 mg/L, 전기분해 10 W+UV 10 W 공정의 TRO 농도는 550 mg/L로 나타났다. TRO 농도를 1차식으로 회귀식을 구한 결과 전기분해 20 W는 기울기 값이 0.6403로 나타났고(R^2 = 0.9952), 전기분해 10 W에서는 0.3634 (R^2 = 0.9733), 전기분해 10 W+UV 10 W공정에서는

0.2720(R^2 = 0.9961)로 나타났다. 전기분해 10 W 공정의 기울기가 전기분해+UV 공정보다 1.33배 높은 것으로 나타났다. 이는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 오존과 같은 산화제가 자외선과 반응하여 OH라디칼을 생성하여 TRO 농도도 감소한 것으로 판단되었다. Moon et al.(2017)은 HOCl, OCl^-와 같은 염소계 산화제도 식(2) ~ 식(4)과 같이 자외선과 반응하여 염소라디칼 및 OH라디칼을 생성한다고 보고하였다.

$$HOCl + h\nu \rightarrow OH\cdot + Cl\cdot \quad (2)$$

$$OCl^- + h\nu \rightarrow O^-\cdot + Cl\cdot \quad (3)$$

$$O^-\cdot + H_2O \rightarrow OH\cdot + OH^- \quad (4)$$

따라서 Fig. 5와 6을 종합 고찰하면 전기분해+UV 공정의 결합으로 오존과 같은 산소계 산화제(Fig. 5), HOCl과 같은 염소계 산화제(Fig. 6)가 전기분해 단일공정보다 감소되지만 오존 및 HOCl 등의 산화제보다 산화력이 우수한 OH·, Cl· 등의 라디칼이 더 많이 생성되기 때문에 감소된 산화제를 보완한다고 판단되었다.

본 연구에서 OH라디칼 농도는 측정하지 않았지만 담수에서 전기분해+UV공정을 결합할 때 OH라디칼의 생성 지표인 4-carboxybenzaldehyde (4-CBA)의 분해가 증가되었다는 Kim and Park(2011)의 연구결과와 Fig. 5와 6에서 관찰된 오존과 TRO 농도감소와 식(1) ~ (4)을 비교해볼 때 해수에서 발생하는 OH라디칼의 생성을 간접적으로 확인할 수 있었다. 또한 산소계, 염소계 산화제 농도가 감소하고, OH라디칼 농도가 증가하지만 총잔류산화제인 TRO 농도가 감소하는 것은 TRO 농도는 비색법으로 측정 가능하지만, OH라디칼은 반감기가 매우 짧아 직접 농도를 측정하기 곤란하고, OH라디칼과 선택적으로 반응한다고 알려진 4-CBA의 분해를 통해서 간접적으로 측정할 수 있기 때문에 TRO 측정으로는 공정의 결합으로 인해 추가 생성된 OH라디칼 농도를 제대로 측정할 수 없는 것이 한 원인이라고 판단되었다(Lim et al., 2019). 감소된 산화제 농도와 생성된 OH라디칼의 상관관계는 추후 실험과 고찰이 더 필요한 것으로 판단되었다.

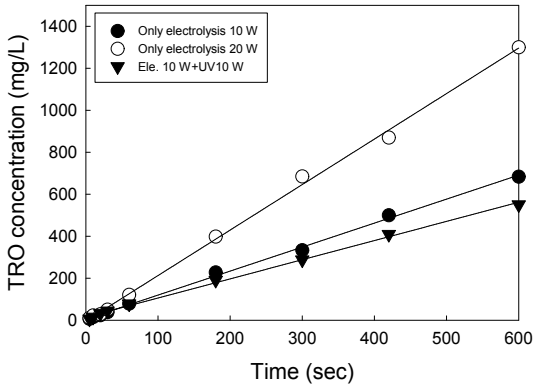

Fig. 6. Effect of reaction time on TRO generation of electrolysis (10 W), electrolysis (20 W) and electrolysis+UV process.

공정의 결합으로 인한 효과를 종합하면 전기분해 10 W+UV 10 W 공정의 7시간후 100% 사멸에 이르는 반응시간은 60초, 전력량은 4,500 W.s가 소요되고, 반면 전기분해 20 W 공정에서는 각각 10초와 1,300 W.s로 반응시간과 전력량이 낮은 것으로 나타났다. 전기분해 20 W 공정과 전기분해 10 W+UV 10 W 공정의 TRO 생성량을 비교하면 같은 반응시간에서 전기분해 단일공정의 TRO 생성량이 높지만 최적 소독시간인 10초(전기분해), 60초(전기분해+UV)에서의 TRO 생성 농도는 각각 22.6 mg/L와 78.1 mg/L로 나타나 소독시간을 시간을 고려하면 전기분해+UV 공정의 생성 TRO 농도가 높게 나타나 소독 후 잔류 TRO 농도가 더 높을 가능성이 있는 것으로 판단되었다.

종합적으로 판단하면 선박평형수 중의 동물성 플랑크톤 제거를 위한 전기분해+UV 공정의 결합은 느린 반응시간, 높은 소요 전력량, 높은 잔류 TRO 농도라는 단점이 나타나 공정의 결합에 의한 시너지 효과를 기대하기 어려운 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과는 담수 중에서 전기분해, UV 및 전기분해+UV 복합공정을 이용한 *E. coli* 소독에서 전기분해+UV 공정을 결합시키면 소독성능이 증가하였으며, 시너지 효과가 존재한다고 보고한 본 연구진의 기존 연구와 다른 것으로 나타났다(Kim and Park, 2011). 이는 주로 전해질 조건의 차이 때문이라고 판단되었다. 전기분해 공정에서 생성되는 산화제 농도는 전해질의 농도에 직접적인 영향을 받는데(Yoo and Kim, 2011), 담수의 경우 전해질로 첨가하는 NaCl의 농도가 주로 1 g/L 정도에서 운전하여 생성되는 산화제의 농도가 낮다. 그러나 NaCl 농도가 32~35 g/L라는 해수의 특성으로 인해 전기분해에서 발생하는 산화제가

매우 높으므로 다른 공정의 결합에 의한 시너지 효과가 적은 것으로 판단되었다.

반면 해수에서 공정의 결합은 산소계, 염소계 산화제가 일부 소모되어 산화력이 높은 OH라디칼이 더 생성되기 때문에 해수 중의 난분해성 물질제거에 더 유리할 수 있는 것으로 사료되었다. 이에 대한 확인은 추후 진행할 예정이다.

4. 결 론

선박평형수 내에 존재하는 동물성 플랑크톤을 불활성화하기 위하여 *Artemia* sp.를 시험 플랑크톤으로 선정하여 전기분해, UV 단일공정과 전기분해+UV 복합 공정에서의 소독 성능과 산화제 발생경향을 고찰하여 다음의 결과를 얻었다.

1. UV 공정과 전기분해 단일공정의 *Artemia* sp. 불활성화를 비교하면, 전기분해 공정의 경우 7 시간후 100% 사멸에 이르는 반응시간은 10초가 소요되고, UV 공정의 경우 420초가 소요되어 전기분해 반응의 초기 반응속도가 매우 빠른 것으로 나타난 전기분해 공정의 성능이 우수한 것으로 판명되었다. 전기분해+UV 공정의 *Artemia* sp. 불활성화 성능은 전기분해 단독 반응보다는 초기사멸 속도가 느리고 UV 단독 반응보다는 초기사멸 속도가 빠른 것으로 나타났다.

2. 7시간후 100% 사멸에 이르는 소독시간은 전기분해 (10 초) > 전기분해+UV (60초) > UV (420 초)로 나타났고, 전기분해, UV 및 전기분해+UV 공정에 소요되는 전력량은 각각 1,300 W.s, 8,400 W.S 및 4,500 W.s로 전기분해 > 전기분해+UV > UV 공정으로 나타났다. 소독 성능과 전력량 면에서 전기분해 공정이 가장 우수한 것으로 나타났다.

3. 전기분해와 UV 공정의 결합으로 인해 오존과 TRO 생성량은 감소하였으나, 이들 산화제가 OH라디칼 생성에 이용되는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다. 선박평형수 중의 동물성 플랑크톤 불활성화를 위한 전기분해+UV 공정의 결합은 느린 사멸시간, 높은 소요 전력량 때문에 공정의 결합에 의한 시너지 효과는 나타나지 않았다.

REFERENCES

International Maritime Organization, 2004, International convention for the control and management of ships' ballast water and sediments.

International Maritime Organization, 2017, Current lists of ballast water management systems, which received type approval certification, Basic and Final Approval.

Jung, C., Kim, D. S., Park, Y. S., 2015, Seawater zooplankton *Aretemia* sp. using physical and chemical disinfection processes, J. Environ. Sci. Intl., 24, 1181-1188.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2010, E. coli inactivation using complex disinfection process, Kor. Soc. Biotech. Bioeng. J., 25, 33-40.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2011, Effect of disinfection process combination on E. coli deactivation and oxidants generation, J. Environ. Sci. Intl., 20, 1-10.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2019, Effect of salt concentration and turbidity on the inactivation of *Artemia* sp. in electrolysis UV, electrolysis+UV processes, J. Environ. Sci. Intl., 28, 291-301.

Korea Maritime Research Institute, 2017, Dilemma for shipowners due to the entry into force of the ballast water management agreement and U.S. regulations, Maritime Kor., 2, 145-147.

Lacasa, E., Tsolaki, E., Sbokou, Z., Rodrigo, M. A., Mantzavinos, D., Diamadopoulos, E., 2013, Electrochemical disinfection of simulated ballast water on conductive diamond electrodes, Chem. Eng. J., 223, 516-523.

Lee, K. H., Lim, J. L., Lee, D. J., Kim, S. S., Ahn, H. W., 2005, Evaluation of characteristics for mixed oxidants produced by electro-chemical method, J. Kor. Sci. Wat. Wastewat., 19, 625-631.

Lim, H. J., Lee, G. H., Hwang, O. M., Choi, K. S., Ryu, K. H., Kwon, J. H., 2019, Feasibility study on DPD TRO sensing system for measuring high range of total resiudual oxidant in ballast water, J. Kor. Sci. Environ. Eng., 41, 31-41.

Moon, B. S., Kim, J. H., Hwang, T. M., 2017, Production and removal of gree residual chlorine by electrolysis without adding salt and pulse UV, J. Wat. Treat., 25, 53-64.

Park, Y. S., Kim, D. S., 2019, Derivation of optimal conditions for TRO (Total Residual Oxidants)

neutralization, The Korean Environmental Sciences Society, 2019 Regular Conference Proceeding, 28, 100.

Werschkun, B., Sommer, Y., Banerji, S., 2012, Disinfection by-products in ballast water treatment : An evaluation of regulatory data, Wat. Res., 46, 2884-4901.

Wright, D. A., Gensemer, R. W., Mitchelmore, C. L., Stubblefield, W. A., van Genderen, E., Dawson, R., Orano-Dawson, C. E., Bearr, J. S., Mueller, R. A., Cooper, W. J., 2010, Shipboard trials of an ozone-based ballast water treatment system, Mar. Pollut. Bull., 60 1571-1583.

Wu, J. J., Yang, J. S., Muruganandham, M., Wu, C. C., 2008, The oxidation study of 2-propanol using ozone-based advanced oxidation processes, Sep. Purif. Tech., 62, 39-46.

Yoo, Y. E., Kim, D. S., 2011, Comparison of dye removal performance and oxidants formation of insoluble electrode, J. Kor. Sci. Environ. Eng., 20, 1273-1284.

• Professor. Dong-Seog Kim
Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu
kimds@cu.ac.kr
• Professor. Young-Seek Park
Division of Liberal Studies, Daegu University
ysparkk@daegu.ac.kr