

ORIGINAL ARTICLE

물리·화학적 처리공정을 이용한 *Artemia sp.* 불활성화 예측을 위한 소독 모델

정창·김동석·박영식^{1)*}

대구가톨릭대학교 환경과학과, ¹⁾대구대학교 기초교육대학

Disinfection Models to Predict Inactivation of *Artemia sp.* via Physicochemical Treatment Processes

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

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 38430, Korea

¹⁾DU University College, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

Abstract

In this study, we examined the suitability of ten disinfection models for predicting the inactivation of *Artemia sp.* via single or combined physical and chemical treatments. The effect of Hydraulic Retention Time (HRT) on the inactivation of *Artemia sp.* was examined experimentally. Disinfection models were fitted to the experimental data by using the GInaFiT plug-in for Microsoft Excel. The inactivation model were evaluated on the basis of RMSE (Root Mean Square Error), SSE (mean Sum Square Error) and r^2 . An inactivation model with the lowest RMSE, SSE and r^2 close to 1 was considered the best. The Weibull+Tail model was found to be the most appropriate for predicting the inactivation of *Artemia sp.* via electrolytic treatment and electrolytic-ultrasonic combined treatment. The Log-linear+Tail model was the most appropriate for modeling inactivation via homogenization and combined electrolytic-homogenization treatment. The double Weibull disinfection model was the most suitable for the predicting inactivation via ultrasonic treatment.

Key words : *Artemia sp.*, Electrolysis, Homogenization, Ultrasonic treatment, Disinfection model, Zooplankton, Microsoft excel, GInaFiT

1. 서론

최근 각국의 항만이나 연안 해역에 평소 서식하지 않았던 해양 미생물들이 출현하여 해양을 오염시키거나 해양 생태계를 파괴하는 현상이 발생되고 있다. 특히 선박 입항 시 선박 평형수(ballast water)에 함유된

외래 해양 미생물의 증가에 의해 생태계의 교란이 일어난다. 선박 평형수는 세계 각국의 연안에서 외래 생물종 유입의 통로로 작용하는데, 선박 평형수 속에 박테리아를 비롯한 미생물, 일부 어종 및 콜레라와 같은 병원균까지 포함되어 있기 때문에 세계 각국의 해양 생태계 파괴의 주원인의 하나로 알려져 있다. 또한

Received 19 December, 2016; Revised 31 January, 2017;

Accepted 13 February, 2017

*Corresponding author: Young-Seek Park, DU University College, Daegu University, Gyeongsan 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.

최근에 건조된 선박은 갈수록 대형화와 고속화되고 있어 더 많은 생물체가 선박 평형수를 통해 빠른 시간 안에 다른 해양 환경으로 배출되고 있는 추세이다(Jun et al., 2005).

국제사회는 선박 평형수에 의해 발생할 수 있는 생태적, 경제적 위해를 막기 위하여 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)를 중심으로 국제협약의 채택을 논의하였다. 채택된 협약에 따라, 생물의 크기 기준으로 50 μm 이상의 생물의 경우 1 m^3 당 10개체 미만의 생존 생물이 남아 있도록 처리해야 하며, 10 μm 에서 50 μm 생물의 경우, 1 mL당 10개체 미만의 생존 생물이 남아 있도록 처리해야 한다(Han, 2009). 현재 개발된 이들 선박 평형수 처리기술들은 IMO (International Maritime Organization) D2 기준에 만족하는 처리 기술들이다. 그러나 2012년 3월 미국에서는 선박으로부터 배출되는 평형수 내에 포함된 생물기준 관련법(Standard for living organisms in ship's ballast water discharged in U.S. waters; Final rule)을 공표했으며 미국에서 선박평형수를 배출하는 모든 선박들은 2013년 12월 1일부터 이 법의 적용을 받고 있다. 현재 공표된 법률에 기재된 미국에서 배출수 내 생물 기준(Phase 1)은 IMO의 기준(D-2)과 동일하지만, 향후 이 기준을 USCG (U.S. Coast Guard) Phase II 수준으로 강화할 것으로 예고하고 있다. USCG Phase II 기준은 박테리아를 제외한 10 μm 이상의 생물의 사멸기준이 1,000배 강화될 것으로 예상된다(Kim and Sung, 2012). 기존의 기술로는 USCG Phase II에서 요구하는 1,000배의 생물 사멸효율을 만족하는데 한계성을 가지고 있다. 따라서 USCG Phase II를 만족하기 위한 기술의 개발이 필요한 실정이다.

현재 선박 평형수 처리를 위한 처리기술에는 여과 또는 막 분리, 원심 분리, 자외선 조사, 가열, 초음파 등의 물리적 처리기술(Pyo et al., 2009)과 오존처리, 전기분해, 과산화수소, 이산화염소 등의 화학적 처리 기술이 있다(Kang et al., 2007; Back et al., 2012).

본 연구진들은 우리나라에서 가장 많이 개발되어 적용되고 있는 전기분해 기술을 바탕으로(Nor, 2010), 다른 물리·화학적 기술의 기본 성능을 평가하고 이들 공정을 결합한 복합 공정이 해수 동물성 플랑크톤인 *Artemia* sp.의 소독에 미치는 영향을 관찰하여 새로운

복합 공정의 적용가능성을 조사·보고한 바 있다(Zheng et al., 2015).

새로운 소독공정이나 복합 소독공정 기술을 명확하게 파악하기 위해서는 소독 모델의 개발이 필요하다. 소독 모델은 1908년 Chick에 의해 최초로 제안되었는데, 적절한 시간 간격에서 생존 미생물 수를 측정하여 일정한 소독제 농도에서 일차 화학반응으로 분석한 소독 모델을 통상적으로 적용하고 있다(Kim et al., 2004). 그러나 전기분해 공정과 같은 고도 산화처리를 이용하는 공정은 소독 과정 중 다양한 활성 화학종들이 발생하여 불활성화가 진행되고 산화제가 연속적으로 전기분해 반응에 의하여 발생하고 자외선 공정의 경우 산화제에 의한 불활성화가 이루어지는 것이 아니기 때문에 기존 소독모델을 그대로 적용하기는 어렵다. 또한, 이들 공정을 결합한 복합 공정의 경우 기존의 소독 모델을 그대로 적용하기는 불가능하다(Back et al., 2012).

본 연구는 단일 물리·화학적 공정과 복합 물리·화학적 공정을 이용하여 선박 평형수 중에 존재하는 박테리아, 식물성 플랑크톤, 동물성 플랑크톤 중에서 제거하기 어려운 동물성 플랑크톤 중의 하나인 *Artemia* sp. 불활성화를 실시한 후 체류시간에 따른 *Artemia* sp. 개체수의 변화 결과를 경험적 소독 모델들에 적용하여 각종 처리공정에 가장 적합한 소독 모델을 조사하여 그 특성을 밝히고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

본 연구에 사용한 모든 용액은 수돗물을 사용하여 제조하였으며, NaCl은 식용 소금(NaCl 함량: 88%)을 이용하였다. 실험에 *Artemia* sp.는 소금물 새우(Aqua Dragons) 또는 Sea Monkeys(상품명)로 알려진 수생 갑각류 속으로, 3개의 눈과 11쌍의 다리를 가지고 있으며 약 15 mm까지 자랄 수 있다. *Artemia* sp.가 살 수 있는 염분의 농도는 25~250 g/L이며, 생리학적으로 최적의 염분 수준은 약 30~35%이다. *Artemia* sp.는 발달의 첫 번째 단계에서 낭중에 저장된 에너지를 섭취한다. 야생의 *Artemia* sp.는 미세한 플랑크톤 조류(planktonic algae)를 먹지만, 양식된 *Artemia* sp.는

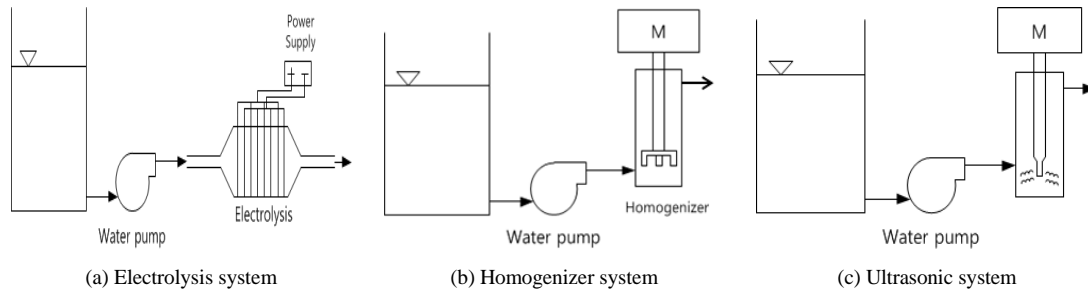


Fig. 1. Schematic diagram of single continuous disinfection process.

효모, 밀가루, 콩 가루 또는 난황을 포함한 미립자 식품을 먹여 키운다. *Artemia sp.*는 쉽게 양식할 수 있기 때문에 해양 수산분야에서 시험균주로 많이 사용되고 있다(Wikipedia, 2016a, 2016b). *Artemia sp.*는 배양을 위한 바람직한 염분 범위는 30-40‰, 초기 pH는 7.5~8이어야 한다. DO는 2.5 mg/L 이상, 온도는 20~25℃로 유지되어야 한다(Brineshrimpdirect, 2016). 동물성 플랑크톤은 *Artemia sp.* 알을 부화시켜 실험에 사용하였다.

전기분해 실험은 실험실에서 제조한 Ru-Ti-Ir 전극을 이용하여 전기분해 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 모든 전극의 크기는 5 × 5 cm 이었다.

아크릴로 만든 시험수 저장탱크(38 L)에 15 g의 *Artemia sp.* 알과 해수 농도와 유사하게 제조된 2 L의 시험수(NaCl, 30 g/L)를 같이 넣은 다음 48시간 동안 연속 배양하였다. 배양시 LED 조명등(20 W)을 점등하고 공기 펌프를 이용하여 물속에 공기를 공급하여 DO 농도를 4 mg/L로 유지하였다. 수돗물의 pH가 7.5로 나타나 조절하지 않고 사용하였다. 히터(Periha

HE-50 W, 창미전기)를 사용하여 수온은 25℃로 유지하였다. 이틀 후 미부화된 알은 자석으로 제거한 다음, 물탱크 속에 있는 부화된 *Artemia sp.*를 충분히 혼합한 후 1 mL의 시험수를 채취하고 *Artemia sp.*의 개체수를 측정하였다.

5일 간 암실에서 25℃로 보존하여 *Artemia sp.*의 운동성을 근거로 한 생사판별을 매일 실시하였다. 눈으로 관찰시 *Artemia sp.*의 움직임이 거의 없는 경우 몸체가 온전한 형태인 플랑크톤에 한해서 5초 이상 움직임이 없을 때 추가적으로 뾰족한 침으로 자극하여 반응이 없으면 죽은 것으로 판단하였다(Kang et al., 2007).

2.2. 실험 방법

본 연구의 소독 시스템은 모두 연속식으로 운전되었으며, 단일 물리·화학적 처리공정(Fig. 1)과 복합 물리·화학적 처리공정(Fig. 2)으로 이루어져 있다.

전기분해 장치는 전극과 전원 공급기로 구성되어 있으며, 반응기 내에서 전극(양극과 음극)을 통해

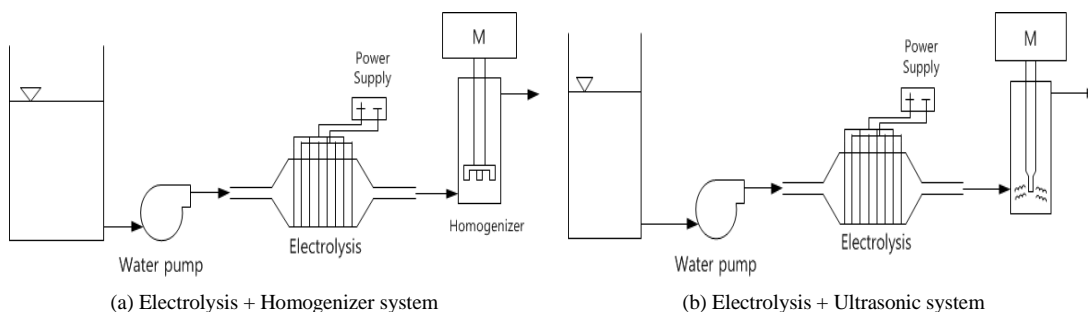


Fig. 2. Schematic diagram of complex continuous disinfection process.

전류(2.65 A)를 인가하여 시험수를 전기분해 하였다. 초음파 소독은 주파수가 20 kHz인 초음파 장치 (Sonics Materials, INS VC 505)를 이용하여 출력을 500 W로 조절하여 실험하였다. 초음파 장치의 초음파 진동자를 시험수 표면 2 cm 아래 지점에 넣어 실험하였다. 균질기 소독은 균질기(Homogenizer SR30, M TOPS)의 회전자 직경이 2 cm인 로타를 물리적 반

응기의 시험수 유입구까지 넣고 27,500 rpm의 속도에서 균질 시간을 조절하여 실험하였다.

복합 처리공정은 전기분해+균질기 공정과 전기분해+초음파 공정 두 가지로 진행하였다. 시험수는 먼저 전기화학 처리공정인 전기분해로 처리하고 처리된 시험수는 물리적 반응기인 균질기 반응기 Fig. 2(a)와 초음파 반응기 Fig. 2(b)를 이용하여 실험을 실시하였다.

Table 1. Model types and equations applied in this experiment

Model type		Model equation
I	Log-linear	$\log_{10}(N) = \log(N_0) - \frac{k_{\max}t}{\ln(10)}$
	Log-linear + Shoulder (Geeraerd et al., 2000)	$\log_{10}(N) = \log_{10}(N_0) - k_{\max}t$ $\ln(10) + \frac{\log_{10}(e^{k_{\max}Sl})}{1 + (e^{k_{\max}Sl} - 1) \cdot e^{-k_{\max}t}}$
II	Log-linear + Tail (Geeraerd et al., 2000)	$\log_{10}(N) = \log_{10}(10^{\log_{10}(N_0)} - 10^{\log_{10}(N_{res})})$ $\cdot \frac{e^{-k_{\max}t}}{e^{-k_{\max}t} + 10^{\log_{10}(N_{res})}}$
	Log-linear + Shoulder + Tail (Geeraerd et al., 2000)	$\log_{10}(N) = \log_{10}[(10^{\log_{10}(N_0)} - 10^{\log_{10}(N_{res})})$ $\cdot e^{-k_{\max}t} \cdot \frac{e^{k_{\max}Sl}}{1 + (e^{k_{\max}Sl} - 1) \cdot e^{-k_{\max}t}}$ $+ 10^{\log_{10}(N_{res})}]$
	Weibull (Mafart et al., 2002)	$\log(10)N = \log_{10}(N_0) - (\frac{t}{\delta})^p$
	Weibull, Fixed p-parameter (Mafart et al., 2002)	$\log(10)N = \log_{10}(N_0) - (\frac{t}{\delta})^p$
III	Weibull + Tail (Albert and Mafart, 2003)	$\log_{10}(N) = \log[(10^{\log_{10}(N_0)} - 10^{\log_{10}(N_{res})})$ $\times 10^{-(\frac{t}{\delta})^p} + 10^{\log_{10}(N_{res})}]$
	Double Weibull (Coroller et al., 2006)	$\log_{10}(N) = \log_{10}(10^{\log(N_0)/(1+10^p)} \times 10^{-(t/\delta_1)^p + \alpha}$ $+ 10^{-(t/\delta_2)^p})$
	Biphasic (Cerf, 1977)	$\log_{10}(N) = \log_{10}(N_0)$ $+ \log_{10}(f \cdot e^{-k_{\max 1}t} + (1-f) \cdot e^{-k_{\max 2}t})$
IV	Biphasic + Shoulder (Geeraerd et al., 2005)	$\log_{10}(N) = \log_{10}(N_0) + \log_{10}$ $\times ((f \cdot e^{-k_{\max 1}t} + (1-f) \cdot e^{-k_{\max 2}t})$ $\cdot \frac{e^{k_{\max 1}Sl}}{1 + (e^{k_{\max 1}Sl} - 1) \cdot e^{-k_{\max 1}t}})$

- N = the microbial cell density or number (CFU/mL)
- N_0 = initial microbial cell density (CFU/mL)
- N_{res} = the residual population density (CFU/mL)
- k_{\max} = the first order inactivation rate constant (1/sec)
- Sl = a parameter representing the shoulder (sec)
- f = the fraction of the initial population in a major subpopulation (0.1)
- (1-f) = the fraction of the initial population in a minor subpopulation
- $k_{\max 1}, k_{\max 2}$ = the specific inactivation rates of the two populations, respectively (1/sec)
- p = a shape parameter (-)
- t = time
- $\alpha = \log_{10}(f/(1-f))$
- δ = a scale parameter (sec)

2.3. 모델화 이론 배경과 소독 모델의 결정

실험한 결과를 Microsoft excel의 추가 기능중 하나인 GInaFiT를 이용하여 데이터 분석을 실시하였으며, 소프트웨어에 포함된 수식 10가지를 Table 1에 나타내었다(Back et al., 2012).

소독 모델의 결정에 있어 가장 중요하게 고려해야 할 것은 모델이 불활성화를 잘 설명하는지와 적용성이며, 모델을 결정하는 여러 가지 방법 중, 가장 간단한 방법은 실험한 결과를 각각 소독 모델을 통계적으로 계산하여 생성된 SSE (least Sum Squared Error), RMSE (Root Mean sum Squared Error), 회귀결정계수 (r^2)를 비교하는 것이다. Back et al.(2012)은 각각 소독 모델에 대하여 예측값과 실험값의 SSE와 RMSE가 가장 낮게 나타나고, r^2 가 1에 가까운 것이 최적의 소독 모델이라고 보고하였다.

본 연구에 사용한 경험적 소독 모델은 크게 4가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 분류는 미생물 불활성화 곡선을 설명하는 log-linear 형태이다. 두 번째 분류는 log-linear 전에 지체기(shoulder)가 나타나는 형태, log-linear 감소 후 끌기(tailing)가 나타나는 형태, 지체기와 끌기가 동시에 나타나는 형태가 속하며, 경험적인 특성과 전형적인 1차 불활성화 속도식을 기초로 하는 특징이 있다. 세 번째 분류는 log-linear 유형 볼록면(convex)이 나타나는 형태, 2상의 불활성화 속도를 나타나는 형태로 정의된다. 네 번째 분류는 log-linear 곡선, log-linear 앞에 지체기가 나타나는 유형, 오목면(concave) 곡선, 볼록면이나 오목면 곡선이 나타난 후 끌기 현상이 나타나는 유형들이다(Xiong et al., 1999; Back et al., 2012). 본 연구는 총 10가지의 모델을 *Artemia sp.*를 이용하여 실험한 결과에 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전기분해 처리공정의 소독 모델 선정과 체류시간에 따른 영향

전기분해가 *Artemia sp.* 불활성화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 전류 2.65 A, 전압 2.6 V, 체류시간 3초에서 실험한 결과를 10개의 소독 모델에 적용하였

다(Fig. 3). Fig. 3에서 10가지 모델 중 Log-linear +Shoulder+Tail 모델, Weibull+Tail 모델, Double Weibull 모델이 비교적 적합한 모델로 판단되었으나, 가장 적합한 소독 모델을 결정하기 위하여 GInaFiT tool 적용 후 생성되는 SSE, RMSE, r^2 를 조사하여 Table 2에 나타내었다. SSE 값과 RMSE 값은 낮게 나타날수록 실측치와 모델 예측치가 근접하는 모델이라는 것을 의미하며, r^2 값이 1에 가까울수록 회귀곡선이 실측치에 근접하므로 적합한 모델이라는 것을 알 수 있다(Back et al., 2012). Table 2에서 보듯이 r^2 값을 근거로 할 때 Log-linear+Shoulder+Tail 모델, Weibull +Tail 모델 및 Double Weibull 모델의 r^2 값은 각각 0.9416, 0.9456, 0.9455로 비슷하게 나타났다. 이 세 모델 중 SSE 값과 RMSE 값이 각각 0.30과 0.1939로 가장 작은 값으로 표현된 Weibull+Tail 모델이 본 실험 결과에 가장 적합한 것으로 판단되었다.

Weibull+Tail 모델에 포함되어 있는 인자들의 의미는 다음과 같다. Weibull+Tail 모델(Table 1)에서 δ 는 첫 번째로 미생물 농도가 1/10로 감소할 때의 시간을 의미하며, p 는 곡선의 모양을 나타내는 인자로서 $p > 1$ 일 때는 볼록면, $p < 1$ 일 때는 오목면을 의미한다(Geeraerd et al., 2005; Back et al., 2012).

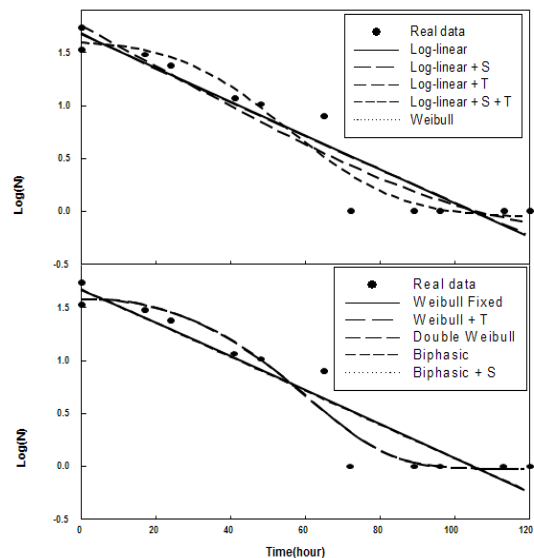


Fig. 3. Application of electrolysis single experimental data on the ten models.

체류시간을 1~5초로 변화시키면서 불활성화 실험을 실시한 후 Weibull+Tail 모델에 적용한 결과를 Table 3에 나타내었다. Weibull+Tail 모델의 인자는 $\text{Log}_{10}(N_0)$, $\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$, δ , p 의 4가지이다. $\text{Log}_{10}(N_0)$ 은 초기 *Artemia* sp.의 개체수에 Log를 취한 값으로 1.49에서 1.65의 비교적 균일한 값을 나타냈다. 이는 초기 *Artemia* sp. 개체수가 일정하게 유지된 상태에서 실험이 잘 이루어졌다는 것을 의미한다. δ 는 *Artemia* sp.의 개체수가 1/10로 감소할 때의 시간으로 체류시간 1초에서는 89.85초였으나 체류시간을 증가시키에 따라 δ 는 감소하여 체류시간 5초에서 32.32초로서 37.2% 감소하였다. 이는 체류시간이 증가됨에 따라 *Artemia* sp.의 불활성화 속도가 증가한다는 것을 의미한다. 특히 체류시간 1초에서 4초까지의 δ 값이 평균 12초의 차이를 나타내었으며 체류시간 4~5초까지의 사이에 δ 값이 8초의 차이를 나타낸 것으로 보아 *Artemia* sp.의 불활성화를 위해서 최적의 체류시간은 4초인 것으로 판단된다.

p 는 불활성화 곡선의 모양을 나타내는데, 본 실험 조건에서는 체류시간 5초에 $p < 1$ 로 나타났으며, 다른

체류시간에서는 $p > 1$ 의 조건을 만족하였다, 그러므로 본 실험 조건에서의 불활성화의 곡선의 모양은 체류시간 5초에서 오목면 형태로 있으며, 다른 체류시간에서는 볼록한 곡면의 형태로 불활성화가 발생한다는 것을 알 수 있다. $p > 1$ 의 볼록한 곡선은 불활성화에 대한 지체기가 발생한다는 것을 의미한다. 체류시간이 증가됨에 따라 p 값은 감소하는 경향을 나타내어 지체기가 감소한다는 것을 알 수 있었다. 특히 체류시간 4~5초 구간에서는 체류시간이 증가됨에 따라 p 값이 급격하게 감소하였다.

3.2. 초음파 처리공정의 소독 모델 선정과 체류시간에 따른 영향

초음파 세기를 500 W로 일정하게 유지한 조건에서 실험하였다. 체류시간 3초에서 실험한 결과를 10개의 소독모델에 적용시킨 결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 모델의 SSE, RMSE, r^2 값을 Table 4에 나타내었다. 가장 높은 r^2 값(0.9572)과 가장 낮은 SSE 값(0.19), RMSE 값(0.1555)을 동시에 고려해 볼 때 가장 적합한 모델은 Double Weibull 모델로 나타났다. Table 4에서 Menu Item 4에 error로 나왔으므로 적용하지

Table 2. Statistical results obtained when applying ten models available in GInaFIT on the electrolysis single experimental data

	Model type	SSE	RMSE	r^2
Menu item 1	Log-linear	0.56	0.2363	0.8990
	Log-linear + Shoulder (Geetaerd et al., 2000)	0.56	0.2489	0.8992
Menu item 2	Log-linear + Tail (Geetaerd et al., 2000)	0.47	0.2297	0.9141
	Log-linear + Shoulder + Tail (Geetaerd et al., 2000)	0.32	0.2009	0.9416
Menu item 3	Weibull (Mafart et al., 2002)	0.55	0.2483	0.8997
	Weibull, Fixed p-parameter (Mafart et al., 2002)	0.56	0.2497	0.8985
	Weibull + Tail (Albert and Mafart, 2002)	0.30	0.1939	0.9456
	Double Weibull (Coroller et al., 2006)	0.30	0.1940	0.9455
Menu item 4	Biphasic (Cerf, 1977)	0.56	0.2642	0.8990
	Biphasic + Shoulder (Geetaerd et al., 2005)	0.56	0.2824	0.8990

Table 3. Effect of HRT on the disinfection of *Artemia* sp. in electrolysis single process on the parameters of Weibull+Tail model

Parameters	Hydraulic retention time(sec)				
	1	2	3	4	5
Log ₁₀ (N ₀)	1.58	1.49	1.55	1.66	1.68
Log ₁₀ (N _{res})	(-)	(-)	(-)	0	0
δ(sec)	86.85	74.67	62.05	40.68	32.32
p(-)	3.66	2.78	2.68	1.51	0.48

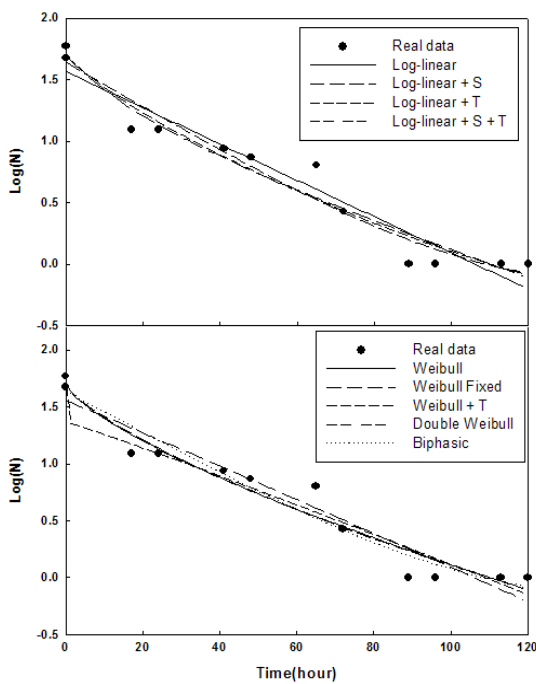


Fig. 4. Application of ultrasound single experimental data on the ten models.

않았다.

500 W의 초음파 세기에서 체류시간을 1~5초로 변화시켜 실험한 결과를 Double Weibull 모델에 적용하여 Table 5에 나타내었다. Double Weibull 모델에서 표현되는 인자들은 Log₁₀(N₀), α, δ₁, δ₂, p 등 5가지이다. Log₁₀(N₀)는 실험 전 범위에서 1.66~1.74 정도로 큰 변동없이 적용되었다. Fig. 4에 보듯이 실제 실험자료(real data)는 48시간 후 *Artemia* sp. 개체수가 감소한 것으로 나타났으며, 48시간에서 65시간까지 *Artemia* sp.의 개체수는 서서히 감소하였고 65시간

이후 *Artemia* sp.의 개체수가 다시 빠르게 감소한 것으로 나타났다. Double weibull 모델에서 불활성화는 집단의 저항에 대한 내성의 차이에 따라 두 그룹으로 구성되어 있으며, 각 집단의 저항이 Weibull 분포에 따라 δ₁과 δ₂로 결정하였다(Coroller et al., 2012). Table 5에서 보듯이 δ₁과 δ₂ 값이 체류시간 1초에서 각 103.45초와 105.29초로 나타났으나, 체류시간 5초 때 17.58초와 21.23초로 감소되어 소독에 대한 저항성이 감소되어 불활성화 속도가 증가한 것으로 나타났다. 모든 체류시간에서 p < 1로 나타나 오목면 형태로 불활성화가 발생한다는 것으로 나타났다. 체류시간을 증가시키에 따라 p 값은 감소하는 경향을 나타내어 지체기가 감소한다는 것을 알 수 있었다.

3.3. 균질기 처리공정의 소독 모델 선정과 체류시간에 따른 영향

균질기의 회전속도 27,500 rpm, 체류시간 3초에서 실험한 결과를 10가지의 소독 모델에 적용하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5는 10가지의 모델 중 Log-linear+Tail 모델, Log-linear+Shoulder+Tail 모델, Weibull+Tail 모델이 적합한 모델로 나타났다.

그러나 Table 6에 나타난 바와 같이 r² 값을 근거로 할 때 Log-linear+Tail 모델과 Log-linear+Shoulder+Tail 모델의 r² 값은 0.9949로 동일하게 나타나 Fig. 5과 동일한 결과를 나타내었다. 그리고 두 모델 중 Log-linear+Tail 모델의 SSE 값은 0.014이었고 RMSE 값은 0.0395로 나타났다. Log-linear+Shoulder+Tail 모델의 SSE 값은 0.01이었고 RMSE 값은 0.0419로 나타났다. Log-linear+Tail 모델은 Log-linear 모델에서 끌기 현상이 나타난 것이며, Log-linear+Shoulder+Tail 모델은 Log-linear 모델에서 지체기

Table 4. Statistical results obtained when applying ten models available in GInaFiT on the experimental single ultrasound process data

	Model type	SSE	RMSE	r ²
Menu item 1	Log-linear	0.30	0.1734	0.9335
Menu item 2	Log-linear + Shoulder (Geetaerd et al., 2000)	0.22	0.1575	0.9506
	Log-linear + Tail (Geetaerd et al., 2000)	0.23	0.1610	0.9484
	Log-linear + Shoulder + Tail (Geetaerd et al., 2000)	0.22	0.1657	0.9514
Menu item 3	Weibull (Mafart et al., 2002)	0.22	0.1553	0.9520
	Weibull, Fixed p-parameter (Mafart et al., 2002)	0.31	0.1857	0.9314
	Weibull + Tail (Albert and Mafart, 2002)	0.22	0.1645	0.9521
	Double Weibull (Coroller et al., 2006)	0.19	0.1555	0.9572
Menu item 4	Biphasic (Cerf, 1977)	0.23	0.1708	0.9484
	Biphasic + Shoulder (Geetaerd et al., 2005)	Error	Error	Error

현상과 끌기 현상이 동시에 발생된 현상으로서 SI은 지체기의 길이, k_{max} 는 비활성화 속도를 의미한다 (Geeraerd et al., 2000). Fig. 5에서 real data를 보면 실험 직후 *Artemia* sp.의 개체수가 급하게 감소되었으므로 지체기 현상이 발생하지 않는 것으로 판단되었다.

Table 6에 이상형 모델인 Biphasic 모델과 Biphasic + Shoulder 모델은 가정에서 중요 집단과 작은 집단이 포함되어 있기 때문에 한 집단이 차지한 비율(f)은 $0 < f < 1$ 이 되어야 한다(Geeraerd et al., 2000). 비율 f 변

수가 주요 모집단의 추정치에서 모두 1로 나타났기 때문에 Menu Item 4에는 error로 표시하고 모델을 채택하지 않았다.

Log-linear+Tail 모델과 Log-linear+Shoulder+Tail 모델을 비교하고 최종 선택하기 위해 균질기의 체류 시간을 1~5초로 변화시켜 실험하여 실험 결과를 Log-linear+Tail 모델과 Log-linear+Shoulder+Tail 모델 적용시켜 생성된 인자들을 정리하여 Table 7과 8에 나타내었다.

Table 5. Effect of HRT on the disinfection of *Artemia* sp. in ultrasound single process on the parameters of Double Weibull model

Parameters	Hydraulic retention time(sec)				
	1	2	3	4	5
Log ₁₀ (N ₀)	1.68	1.66	1.71	1.77	1.74
α	1.34	1.77	1.77	0.33	1.77
δ_1 (sec)	103.45	65.79	48.70	80.05	17.58
δ_2 (sec)	105.29	65.79	48.70	83.25	21.23
p(-)	1.73	0.95	0.67	0.85	0.31

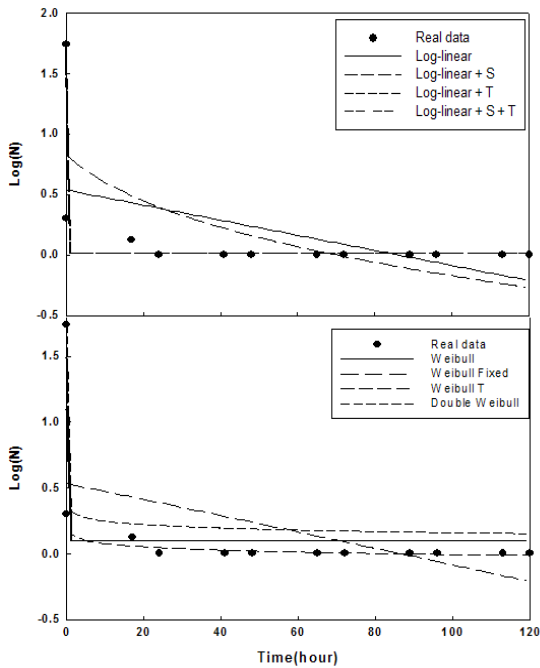


Fig. 5. Application of homogenizer single process experimental data on the ten models.

Log-linear+Tail 모델에 적용시켜 본 결과(Table 7), $\text{Log}_{10}(N_0)$ 는 1.70~1.74로 비교적 거의 일정하게 나타났다. $\text{Log}_{10}(N_{res})$ 는 체류시간 1초에서는 0.03으로 나타났다으며, 체류시간 2~5초에서는 0으로 나타남으로써 본 조건에서 *Artemia* sp.의 불활성화가 완벽하게 발생한다는 것을 알 수 있었다. 불활성화 속도를 의미하는 k_{max} 는 체류시간 1초에서 270.81 1/sec을 보였으며, 체류시간 2~3초에서 390.53 1/sec, 500.40 1/sec로 증가하였으나 체류시간 4초 이상의 체류시간에서 k_{max} 는 일정한 값을 나타내었다. 그러므로 *Artemia* sp.를 불활성화 시키기 위해서는 체류시간을 4초 이상으로 유지해야 할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

소독실험 결과를 Log-linear+Shoulder+Tail 모델에 적용시켜 본 결과(Table 8), $\text{Log}_{10}(N_0)$ 값과 $\text{Log}_{10}(N_{res})$ 값이 Log-linear+Tail 모델과 같은 값을 나타냈으며, 비불활성화 속도상수 (k_{max})도 같은 경향을 나타내었다.

지체기를 의미하는 SI 값이 음의 값을 나타내기 때문에 지체기가 없음을 알 수 있었다. Menu item 2에

Table 6. Statistical results obtained when applying ten models available in GInaFiT on the experimental homogenizer single process data

	Model type	SSE	RMSE	r^2
Menu item 1	Log-linear	1.99	0.4455	0.2043
	Log-linear + Shoulder (Geetaerd et al., 2000)	1.64	0.4265	0.4033
Menu item 2	Log-linear + Tail (Geetaerd et al., 2000)	0.014	0.0395	0.9949
	Log-linear + Shoulder + Tail (Geetaerd et al., 2000)	0.01	0.0419	0.9949
Menu item 3	Weibull (Mafart et al., 2002)	0.54	0.2452	0.8028
	Weibull, Fixed p-parameter (Mafart et al., 2002)	2	0.4712	0.2718
	Weibull + Tail (Albert and Mafart, 2002)	0.07	0.0947	0.9739
	Double Weibull (Coroller et al., 2006)	0.32	0.2005	0.8828
Menu item 4	Biphasic (Cerf, 1977)	Error	Error	Error
	Biphasic + Shoulder (Geetaerd et al., 2005)	Error	Error	Error

Table 7. Effect of HRT on the disinfection of *Artemia* sp. in homogenizer single process on the parameters of Log-linear+Tail model

Parameters	Hydraulic retention time(sec)				
	1	2	3	4	5
Log ₁₀ (N ₀)	1.70	1.70	1.70	1.74	1.74
Log ₁₀ (N _{res})	0.03	0	0	0	0
k _{max} (1/sec)	270.81	390.53	500.40	1009.76	1009.76

이 두 모델 중 지체기가 없는 Log-linear+Tail 모델이 본 실험 조건에 가장 적합한 것으로 판단되었다.

3.4. 복합 처리공정의 소독 모델 선정

전기분해는 전류 2.65 A, 전압 2.6 V로 운전하고, 균질기의 회전자 회전속도는 27,500 rpm, 초음파 공정은 500 W의 출력으로 유지한 조건에서 체류시간을 1~5초로 변화시키면서 복합 처리공정의 소독 실험을 실시하였다. 복합 처리공정의 소독 모델을 선정하는 방법은 단일 처리공정의 실험방법과 같다. 두 공정을 결합한 복합 공정의 실험 결과에 10종류의 소독 모델을 적용해서 SSE 값, RMSE 값과 r² 값을 구한 후 최적 소독 모델을 한 종류 선정하여 Table 9에 나타내었다. 전기분해+균질기 복합 처리공정은 Log-linear+Tail 모델이 적합한 것으로 나타났다. 전기분해+초음파 복합 처리공정은 Weibull+Tail 모델이 적합한

것으로 나타났다.

전기분해+균질기 복합 처리공정을 이용하여 *Artemia* sp.의 불활성화에 미치는 체류시간을 1~5초로 변화시킨 불활성화 실험결과를 Log-linear+Tail 모델에 적용한 결과를 Table 10에 나타내었다. Log₁₀(N₀)는 1.74로 일정한 값을 나타내었으며, Log₁₀(N_{res})값이 0으로 나타나 불활성화가 완벽하게 이루어지는 것으로 나타났다. 단일 균질기 처리공정을 이용한 결과와 비슷하게 나타났으나, 전기분해+균질기 복합 처리공정에서 *Artemia* sp.의 불활성화에 전기분해 공정과 균질기 공정을 동시 적용하기 때문에 체류시간 1~3초 구간에 k_{max} 값은 단일 균질기 처리공정보다 높게 나타났으며, 균질기 공정의 성능이 전기분해 공정보다 *Artemia* sp.의 불활성화에 우수한 것으로 판단되어 체류시간이 4초 이상 증가하면 전기분해+균질기 복합 처리공정과 단일 균질기 처리공정은 큰 차이가 없는 것으로 판단

Table 8. Effect of HRT on the disinfection of *Artemia* sp. in homogenizer single process on the parameters of Log-linear+Shoulder+Tail model

Parameters	Hydraulic retention time(sec)				
	1	2	3	4	5
Log ₁₀ (N ₀)	1.70	1.70	1.70	1.74	1.74
Log ₁₀ (N _{res})	0.03	0	0	0	0
k _{max} (1/sec)	3	3.64	4.05	5.11	5.11
SI(sec)	-2.01	-1.97	-2.02	-3.35	-3.35

Table 9. Statistical results obtained when applying model available in GInaFiT on electrolysis and homogenizer complex continuous process data

Experimental conditions	Model type	SSE	RMSE	r ²
Electrolysis + homogenizer	Log-linear + Tail	0	0	1
Electrolysis + ultrasound	Weibull + Tail	0.23	0.1689	0.9484

Table 10. Effect of HRT on the disinfection of *Artemia* sp. in electrolysis and homogenizer complex continuous process on the parameters of Log-linear+Tail model

Parameters	Hydraulic retention time(sec)				
	1	2	3	4	5
Log ₁₀ (N ₀)	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74
Log ₁₀ (N _{res})	0	0	0	0	0
k _{max} (1/sec)	439.44	508.77	518.33	1009.76	1009.76

Table 11. Effect of HRT on the disinfection of *Artemia* sp. in electrolysis and homogenizer complex continuous process on the parameters of Weibull+Tail model

Parameters	Hydraulic retention time(sec)				
	1	2	3	4	5
Log ₁₀ (N ₀)	1.53	1.61	1.46	1.52	1.70
Log ₁₀ (N _{res})	(-)	(-)	(-)	0	0
δ(sec)	71.39	50.79	42.92	41.98	4.14
p(-)	1.91	1.41	1.63	0.50	0.17

되었으며, k_{max} 값은 1009.76로 동일한 값으로 나타났다. 그러므로 체류시간 1초라는 짧은 소독시간에서도 *Artemia* sp.를 완전 불활성화시킬 수 있는 것으로 나타났다.

전기분해+초음파 복합 처리공정을 이용하여 *Artemia* sp.의 불활성화에 미치는 체류시간에 대한 실험을 수행하여, 그 결과를 Weibull+Tail 모델에 적용하여 Table 11에 정리하였다. Log₁₀(N₀)는 1.46~1.70로 나타났으며, δ 값이 체류시간 1~4초 구간에 서서히 감소되었으며, 체류시간 4초에서 5초로 변화시킴에 따라 4.14초로 급하게 감소된 것으로 나타났다. p 값도 감소되어 있는 것으로 나타났다. δ와 p 값은 체류시간 5초에서 가장 낮게 나타남으로써 불활성화 속도가 가장 빠르다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 본 실험 조건에서는 체류시간 5초에서 불활성화가 가장 잘 발생될 수 있는 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구는 선박 평형수 내에 존재하는 동물성 플랑크톤 *Artemia* sp.를 효과적으로 처리하기 위하여 전기분해, 초음파, 균질기 단일 공정과 전기분해+균질기,

전기분해+초음파 복합 처리공정에서 HRT 변화에 따른 *Artemia* sp. 불활성화 실험 결과를 Microsoft Excel의 추가 기능중 하나인 GInaFiT를 이용하여 경험적 소독모델을 적용하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 처리공정 종류에 따라 *Artemia* sp.의 불활성화의 속도 차이가 있었고 모델 적합성에도 차이가 있었다.
- 2) *Artemia* sp.의 소독 효과가 가장 높은 균질기 단일공정과 전기분해+균질기 공정의 모델링은 지체기가 없는 모델인 Log-linear+Tail 모델이 가장 적합하였다. Log-linear+Tail 모델에서 최적 운전인자를 도출하기 위한 인자는 비불활성화 속도 k_{max} (1/sec) 값이었다. k_{max} (1/sec) 값이 증가함에 따라 불활성화 속도가 빨라졌다.
- 3) 전기분해 단일공정과 전기분해-초음파 복합 처리공정에서는 Weibull+Tail 모델이 가장 적합하였다. Weibull+Tail 모델에서 최적 운전인자는 δ (sec)값과 불활성화의 지체기를 표시하는 p (-)값이었다. 체류시간이 증가함에 따라 δ (sec)값과 p (-)값은 작아진 것으로 나타나 최적의 운전점을 도출하는 인자로 적절하였다.
- 4) 소독 효과가 낮은 초음파 공정은 소독 효과가 복잡한 Double Weibull 모델이 적합하였다.

REFERENCES

- Back, S. E., Kim, D. S., Park, Y. S., 2012, Application of disinfection models on the plasma process, J. Kor. Environ. Sci., 21(6), 695-704.
- Back, S. E., Kim, D. S., Park, Y. S., 2012, Inactivation of *Ralstonia Solanacearum* using aquatic plasma process, J. Kor. Environ. Sci., 21(7), 797-804.
- Brineshrimpdirect, 2016, <http://www.brineshrimpdirect.com/c123/what-guidelines-culturing-brine-shrimp-c119.html>
- Coroller, L., Leguerinel, I., Mettler, E., Savy, N., Mafart, P., 2006, General model, based on two mixed weibull distributions of bacterial resistance, for describing various shapes of inactivation curves, Appl. Environ. Microbiol., 10, 6493-6502.
- Geeraerd, A. H., Herremans, C. H., Van Impe, J. F., 2000, Structural model requirement to describe microbial inactivation during a mild heat treatment, Int. J. Food. Microbiol., 59, 185-209.
- Han, K. H., 2009, Development status of ballast water treatment system, Marine Kor., 3, 88-93.
- Jun, S. E., Seo, W. H., Kim, J. H., Lee, T. H., Sang, B. I., 2005, Sterilization treatment of marine microorganism by electrochemical method, 2005 Fall Proceedings of Kor. Soc. Environ. Eng., 1326-1331.
- Kang, J. H., Shin, K. S., Hyun, B. G., Jang, M. C., Kim, E. C., Man Chang., 2007, The electrochemical chlorination for marine plankton community disinfection, J. Kor. Soc. Marine. Environ. Eng., 10(3), 127-137.
- Kim, C. W., Kim, S. G., Yun, T. I., Yu, C. H., 2004, Environmental microbiology, Donghwa Techniques, Seoul, 103-114.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2015, A Study on the inactivation of phytophthora blight pathogen (*Phytophthora capsici*) using plasma process, J. Kor. Environ. Sci. Int., 23(9), 1601-1608.
- Kim, Y. S., Sung, E. J., 2012, Development trends of ballast water management systems, J. Soc. Nav. Arch. Kor., 49(3), 40-43.
- Nor, Y. K., 2010, Design for ballast water treatment system, MS Thesis, Pusan National University, Busan, Korea.
- Park, Y. M., Kwon, O. C., Park, J. W., Chung, G. Y., Lee, J. E., Seo, E. W., 2013, Effects of low powered ultrasonic wave exposure on *Microcystis* sp. (Cyanobacteria), J. Kor. Environ. Sci., 31(2), 113-120.
- Pyo, T. S., Cheon, S. G., Park, D. W., Choi, S. K., Kim, S. Y., Kil, G. S., 2009, Design and fabrication of a ballast water treatment system using UV lamps, J. Kor. Soc. Marine. Environ. Eng., 33(6), 952-958.
- Wikipedia, 2016a, https://en.wikipedia.org/wiki/Artemia_salina
- Wikipedia, 2016b, https://en.wikipedia.org/wiki/Brine_shrimp
- Xiong, R., Xie, G., Edmondson, A. E., Sheard, M. A., 1999, A Mathematical model for bacterial inactivation, J. Food. Microbiol., 46, 45-55.
- Zheng, C., Kim, D. S., Park, Y. S., 2015, Inactivation of seawater zooplankton *Aretemia* sp. using physical and chemical processes, J. Kor. Environ. Sci., 24(9), 1181-1188.