

플라즈마 공정에 대한 소독 모델 적용

백상은 · 김동석 · 박영식^{1)*}

대구가톨릭대학교 환경과학과, ¹⁾대구대학교 기초교육원
(2012년 2월 15일 접수; 2012년 3월 23일 수정; 2012년 5월 14일 채택)

Application of Disinfection Models on the Plasma Process

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

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

¹⁾Faculty of Liberal Education, Daegu University, Gyeongbuk 712-714, Korea

(Manuscript received 15 February, 2012; revised 23 March, 2012; accepted 14 May, 2012)

Abstract

The application of disinfection models on the plasma process was investigated. Nine empirical models were used to find an optimum model. The variation of parameters in model according to the operating conditions (first voltage, second voltage, air flow rate, pH) were investigated in order to explain the disinfection model. In this experiment, the DBD (dielectric barrier discharge) plasma reactor was used to inactivate *Ralstonia Solanacearum* which cause wilt in tomato plantation. Optimum disinfection models were chosen among the nine models by the application of statistical SSE (sum of squared error), RMSE (root mean sum of squared error), r^2 values on the experimental data using the GInaFiT software in Microsoft Excel. The optimum model was shown as Weibull+tail model followed by Log-linear+Shoulder+Tail model. Two models were applied to the experimental data according to the variation of the operating conditions. In Weibull+tail model, $\text{Log}_{10}(N_0)$, $\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$, δ and p values were examined. And in Log-linear+Shoulder+Tail model, the $\text{Log}_{10}(N_0)$, $\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$, k_{max} , SI values were calculated and examined.

Key Words : Disinfection model, Plasma process, *Ralstonia Solanacearum*, First voltage, Second voltage, Air flow rate, pH

1. 서론

토경재배와 달리 수경재배에서는 수질을 세밀하게 관리할 수 있으므로 높은 생산성과 품질향상 등의 장점이 있으나, 병원성 미생물이 침투하게 되면 빠르게 확산되는 단점이 있어 재이용하지 않고 양액을 버리는 방법으로 운전하고 있다. 폐기되는 양액은 높은 농도의 질소와 인을 함유하고 있기 때문에 수질오염에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 새로운 양액을 생산해야

하므로 많은 비용이 추가로 소요된다. 그러므로 양액을 제대로 소독하여 병원성 미생물을 불활성화시켜 양액을 순환시킬 수 있다면, 양액 생산 비용을 절감할 수 있고 양액 폐기에 따른 수질오염을 막을 수 있을 것으로 기대된다.

수중에 존재하는 미생물을 불활성화 시키기 위하여 염소, 요오드, 오존 등과 같은 다양한 화학 소독제들이 활용되어 왔다. 이러한 소독제 및 소독에 영향을 미치는 소독제 농도, 접촉시간, 온도 등과 같은 인자들의 특성을 효과적으로 기술하기 위하여 다양한 소독 모델들이 개발되고 있다.

소독 모델은 1908년 Chick에 의해 최초로 제안되

*Corresponding author : Young-Seek Park, Faculty of Liberal Education, Daegu University, Gyeongbuk 712-714, Korea
Phone: +82-53-850-4571
E-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

었으며, 적절한 시간 간격에서 생존 미생물 수를 측정하여 일정한 소독제 농도에서 소독 반응 속도를 연구하여, 박테리아와 화학 소독제 사이의 반응을 일차 이분자 화학 반응으로 분석해서 소독 모델을 제안한 바 있다(김 등, 2004).

또한, 미생물의 불활성화 정도를 결정하기 위해 소독제와 미생물간에 필요한 접촉시간에 대한 정의가 필요하며, 이를 CT (소독제 농도 C × 접촉시간 T) 값으로 규정하고 있다 (Facile 등, 2000). 기존 소독 모델에 관한 연구들에서는 소독제와 접촉 시간의 상관관계를 평가하기 위해 Chick-Watson 모델, Hom 모델, Rational 모델 등의 여러 가지 소독 모델들을 제시한 바 있다(정, 2006). 이와 같은 소독 모델들은 회분식 반응기에서 한 종류의 소독제가 접촉시간동안 일정하게 유지된다는 가정 하에 설정되었는데, 일정한 시간 동안 비교적 안정성을 유지하는 염소의 경우에는 이러한 모델이 잘 적용될 수 있으나, 미생물에 효과적으로 작용하면서 반응시간 동안 지속적으로 감소하는 오존이나 이산화염소와 같은 소독제의 작용에는 한계점을 나타내었다. 그러므로 이러한 제약점을 극복하기 위하여 modified Chick-Watson 모델, integrated Hom 모델, modified Rational 모델 등이 개발되어 사용되어 왔으나, 복잡한 변수들로 인하여 사용의 편의성이 떨어짐으로써 delayed Chick-Watson 모델이나 modified Hom 모델 등이 제안되어 사용되었고 (Larson과 Marinas, 2003; 조와 윤, 2005), 소독제 농도가 감소하는 회분식 반응에 적용할 수 있는 modified delayed Chick-Watson 모델이 개발되기도 하였다(Cho 등, 2003).

그러나 전기분해 공정(박과 김, 2011)이나 플라즈마 공정(김과 박, 2011)과 같은 고도 산화처리를 이용하는 공정에서는 소독 과정 중 오존이나 과산화수소와 같은 다양한 활성 화학종들이 연속적으로 발생하여 소독이 진행되는 경우에는 하나의 소독제 성분을 기준으로 하는 것이 아니고 동시에 다수의 소독제가 불활성화 반응에 관여할 뿐만 아니라 기존의 소독 반응에서는 시간의 경과에 따라 소독제의 농도가 감소하는 데에 반해 시간이 경과됨에 따라 소독제의 농도가 증가할 수 있어 기존의 소독 모델을 그대로 적용하기에는 상당한 어려움이 있다.

그러므로 본 연구에서는 수중 플라즈마 공정을 이용한 *Ralstonia Solanacearum* 불활성화 실험 중 시간에 따른 미생물 개체수의 변화를 연속적으로 조사하여, 많은 연구자들이 문헌상에서 제시하고 있는 다양한 경험적 소독 모델들(McMeekin 등, 1993; Baranyl과 Roberts, 1994; Rosso 등, 1995; Van Impe 등, 1995; Geeraerd 등, 2000)에 적용하여 최적의 소독 모델을 도출하고, 플라즈마 공정의 여러 운전 인자들(1차 전압, 2차 전압, 공기 유량, pH)의 변화에 따른 최적 소독 모델 내 parameter들의 변화를 조사함으로써 소독 모델을 효과적으로 해석하고자 하였다. 본 연구에 이용된 *R. Solanacearum*는 수경 재배에서 가지, 고추 및 토마토 등의 작물에서 풋마름병을 유발시키는 미생물로 알려져 있다(Lee 등, 2005).

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

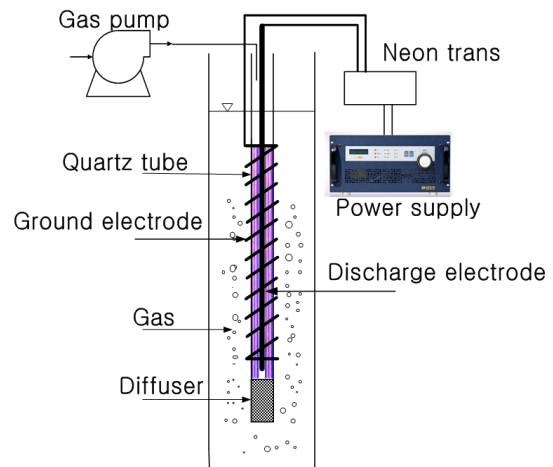


Fig. 1. Schematic diagram of dielectric barrier discharge (DBD) plasma process.

본 실험에 사용된 유전체 장벽(dielectric barrier discharge, DBD) 플라즈마 실험 장치의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. DBD 플라즈마 반응조 전체 부피는 1 L이고, 원형 강화 유리로 제작하였다. 유전체인 석영관의 내경과 두께는 각각 7 mm와 1 mm로 제작되었고, 접지 전극과 방전 전극은 각각 스프링 형태(φ 1

mm)와 직선 형태($\phi 2$ mm)의 티타늄 선을 사용하였다.

반응조에 주입되는 기체는 공기로서, 공기펌프 (YP-15A)를 사용하여 발생된 공기를 로터미터를 이용하여 유량을 조절한 뒤 석영관 내부로 공급하였다. 본 실험에 사용된 전원공급 장치는 크게 1차 전압조절 장치와 2차 전압조절장치로 구분 할 수 있다. 1차 전압조절장치 (power supply)는 반응기에 전원을 공급하기 위한 장치로서 전압 조절기(대립 슬라이드스)를 이용하여 30 V~160 V로 변화시키면서 운전하였으며, 2차 전압조절장치 (Neon trans)는 플라즈마를 형성시키기 위하여 고전압을 발생시켜 주는 장치로서 네온 트랜스(NT-500)를 이용하여 주파수 20 kHz인 조건에서 4, 7.5, 15 kV로 변화시키면서 운전하였다.

본 실험에 사용된 풋바름병균(*Ralstonia solanacearum*)은 한국미생물센터(KACC 10701)에서 분양받아 실험을 실시하였다. 영양액 (beef extract 3 g, peptone 5 g, glucose 2.5 g, distilled water 1 L)에 접종하여 진탕배양기(30 °C, 150 rpm)에서 36시간 배양한 다음 원심분리(4,000 rpm, 20 min)후 균 stock을 확보하였다.

2.2. 실험 방법

NH₄H₂PO₄ 153 mg/L, KNO₃ 808 mg/L, Ca(NO₃)₂·4H₂O 944 mg/L, MgSO₄·7H₂O 492 mg/L를 각각 10 mL씩 첨가하고, 미량원소(1 L 중 H₃BO₃ 2.86 g, MnCl₂·4H₂O 1.81 g, ZnSO₄·7H₂O 0.22 g, CuSO₄·5H₂O 0.08 g, Na₂MoO₄·2H₂O 0.025 g)를 1 mL 첨가한 다음 증류수를 주입하여 1 L의 양액을 제조하였다.

균 stock 용액 1 mL를 제조된 1 L의 양액에 주입하여 초기 미생물 농도를 3x10¹⁰ CFU/L로 설정한 다음, 소독 실험을 수행하였다. 적정시간 간격으로 시료를 채취하여 무균접종실에서 적절한 희석을 실시한 다음, 30 °C로 유지되는 BOD 배양기에서 48시간동안 배양한 후 집락을 측정하여 균수를 계수하였다. 채취된 1개의 시료 당 3개의 평판을 제조하여 평균값을 측정하였다. 이 때 사용된 배지는 Oxoid사의 CM0017 (Lab-Lemco agar: Lab-Lemco powder 3.0 g, peptone 5.0 g, agar 15.0 g)으로서, 고압증기멸균기(121 °C, 30 min)로 멸균하여 사용하였다.

2.3. 소독 모델의 결정

Microsoft excel의 추가 기능 중 하나인 GInaFiT를 설치하였고, 이 프로그램을 이용하여 실험 결과 값과 비교하여 최적의 소독 모델을 선정하였다.

소독 모델의 결정에서 가장 중요하게 고려되어야 할 점은 먼저 소독 모델이 미생물의 불활성화를 잘 설명하는가와 실제 적용이 가능한가 하는 것이다. 소독 모델을 결정하는 방법은 여러 가지가 있으나, 가장 간단하고 효과적인 방법은 SSE (least sum of squared error), RMSE (root mean sum of squared error), 회귀 결정계수 (r^2)를 통계적으로 계산하여 사용하는 것이다. 즉, 각각의 소독 모델에 대하여 예측값과 실험값의 SSE와 RMSE가 가장 적게 나타나고, r^2 가 1에 가까울 때를 최적의 소독모델로 결정하였다.

본 연구에 사용된 소독 모델은 크게 4개로 나눌 수 있다. 첫 번째 분류는 미생물의 불활성화 곡선을 설명하는 전통적인 log-linear 형태이다. 두 번째 분류는 전통적인 log-linear, log-linear 전에 지체기(shoulder)가 나타나는 유형, log-linear 감소 후에 끌기(tailing) 현상이 나타나는 유형, 지체기+log-linear+끌기가 동시에 나타나는 유형이 속하며, 경험적인 특성과 전형적인 1차 불활성화 속도식을 기초로 하고 있다는 특징을 가지고 있다. 세 번째 분류는 전형적인 log-linear 유형, convex(볼록면)이 나타나는 형태, 2상의 불활성화 속도를 나타내는 형태로 정의된다. 네 번째 분류는 전형적인 log-linear 곡선, log-linear 전에 지체기(shoulder)가 나타나는 유형, concave(오목면) 곡선, convex(볼록면)/concave(오목면) 곡선이 나타난 후 끌기 현상이 나타나는 유형들이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소독모델 선정

Fig. 2는 소독 실험 중 가장 대표적인 실험 조건이라고 할 수 있는 1차 전압 100 V, 2차 전압 15 kV, 공기 공급량을 4 L/min인 조건에서 실험한 결과를 microsoft excel의 추가 기능인 GInaFiT tool을 사용하여 9가지 모델에 적용시킨 결과이다. 9가지 모델 중 Log-linear+Tail 모델, Log-linear+Shoulder 모델, Weibull+Tail 모델들이 가장 적합한 모델로 나타났으

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 <i>et al.</i> , 2000)	$\log_{10}(N) = \log_{10}(N_0) - k_{\max} t$ $\ln(10) + \frac{\log_{10}(e^{k_{\max} SI})}{1 + (e^{k_{\max} SI} - 1) \cdot e^{-k_{\max} t}}$
II	Log-linear + Tail (Geeraerd <i>et al.</i> , 2000)	$\log_{10}(N) = \log_{10}\left(10^{\log_{10}(N_0)} - 10^{\log_{10}(N_{res})} \cdot e^{(-k_{\max} t)} + 10^{\log_{10}(N_{res})}\right)$
	Log-linear + Shoulder + Tail (Geeraerd <i>et al.</i> , 2000)	$\log_{10}(N) = \log_{10}\left[\left(10^{\log_{10}(N_0)} - 10^{\log_{10}(N_{res})}\right) \cdot e^{-k_{\max} t} \cdot \left(\frac{e^{k_{\max} SI}}{1 + (e^{k_{\max} SI} - 1) \cdot e^{-k_{\max} t}} + 10^{\log_{10}(N_{res})}\right)\right]$
	Weibull (Mafart <i>et al.</i> , 2002)	$\log_{10}(N) = \log_{10}(N_0) - \left(\frac{t}{\delta}\right)^p$
III	Weibull, Fixed p-parameter (Mafart <i>et al.</i> , 2002)	$\log_{10}(N) = \log_{10}(N_0) - \left(\frac{t}{\delta}\right)^p$
	Weibull + Tail (Albert and Mafart, 2003)	$\log_{10}(N) = \log\left[\left(10^{\log(N_0)} - 10^{\log(N_{res})}\right) \times 10^{\left(-\left(\frac{t}{\delta}\right)^p\right)} + 10^{\log(N_{res})}\right]$
	Biphasic (Cerf, 1977)	$\log_{10}(N) = \log_{10}(N_0) + \log_{10}\left(f \cdot e^{-k_{\max 1} t} + (1-f) \cdot e^{-k_{\max 2} t}\right)$
IV	Biphasic + Shoulder (Geeraerd <i>et al.</i> , 2005)	$\log_{10}(N) = \log_{10}(N_0) + \log_{10}\left(\left(f \cdot e^{-k_{\max 1} t} + (1-f) \cdot e^{-k_{\max 2} t}\right) \cdot \frac{e^{k_{\max 1} SI}}{1 + (e^{k_{\max 1} SI} - 1) \cdot e^{-k_{\max 1} t}}\right)$

- 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)
- SI = a parameter representing the shoulder (sec)
- f = the fraction of the initial population major subpopulation
- (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 (-)
- δ = a scale parameter (sec)

나, 표면상으로 가장 적합한 모델을 선정하기는 곤란하였다.

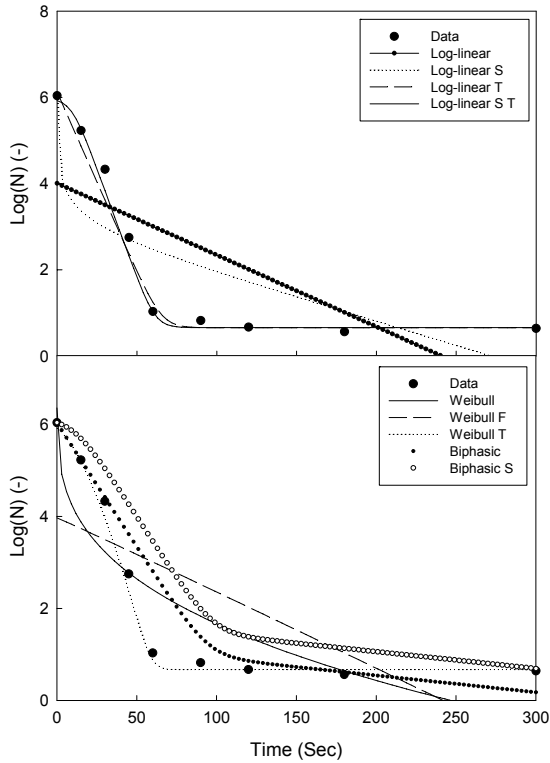


Fig. 2. Application of experimental data on the nine models.

그러므로 가장 적합한 소독 모델을 결정하기 위하여 GInaFiT tool 운영 후 생성되는 SSE, RMSE, r^2 를 Table 2에 나타내었다. SSE 값과 RMSE 값은 적을수록 실측치와 모델 예측치가 근접하는 모델이라는 것을 의미하며, r^2 값이 1에 가까울수록 회귀곡선이 실험 결과치에 근접하므로 적합한 모델이라는 것을 알 수 있다. r^2 값을 근거로 할 때 Log-linear+Tail 모델, Log-linear+Shoulder+Tail 모델, Weibull+Tail 모델들의 r^2 값은 0.99로 동일하게 나타나 Fig. 2와 동일한 결과를 나타내었다. 이 세 모델 중 SSE와 RMSE이 각각 0.08과 0.12로 가장 작은 값으로 표현된 Weibull+Tail 모델이 본 실험 결과에 가장 적합한 것으로 나타났으며, 다음으로는 Log-linear+Shoulder+Tail 모델이 적합한 것으로 판단되었다.

Table 1에 정리된 Weibull+Tail 모델과 Log-linear+Shoulder+Tail 모델에 포함되어 있는 parameter들의 의미를 살펴보면 다음과 같다. Weibull+Tail 모델에서 δ 는 $p=1$ 일 때 첫 번째로 미생물 농도가 1/10로 감소할 때의 시간을 의미하며, p 는 곡선의 모양을 나타내는 parameter로서 $p>1$ 일 때는 convex (볼록면), $p<1$ 일 때는 concave (오목면)를 의미한다(Geeraerd 등, 2005). Van Boekkel (2002)와 Mafart 등(2002)은 δ 와 p 가 매우 밀접한 상관관계를 가지고 있어 구조적으로 모순이 있으나, 이 모순점은 p 값을 고정함으로써 피할 수 있다고 보고한 바 있다(Peleg와 Penchina, 2000). 그러므로 Weibull+Tail 모델은 convex (볼록면), concave (오목면), linear, tailing 효과를 모두 설명할 수 있는 모델로 인식되고 있다.

또한, Log-linear+Shoulder+Tail 모델은 Log-linear 모델에서 지체기 (shoulder) 현상과 끌기 (tailing) 현상이 동시에 발생하는 현상으로서 SI은 지체기의 길이, k_{max} 는 비활성화속도를 의미한다(Geeraerd 등, 2000).

Table 2. Statistical measures obtained when applying nine models available in GInaFiT on the experimental data

Model Type		SSE	RMSE	r^2
Menu Item 1	Log-linear	18.65	1.63	0.52
	Log-linear + Shoulder (Geeraerd <i>et al.</i> , 2000)	11.22	1.37	0.71
Menu Item 2	Log-linear + Tail (Geeraerd <i>et al.</i> , 2000)	0.56	0.30	0.99
	Log-linear + Shoulder + Tail (Geeraerd <i>et al.</i> , 2000)	0.21	0.20	0.99
	Weibull (Mafart <i>et al.</i> , 2002)	7.70	1.13	0.80
Menu Item 3	Weibull, Fixed p-parameter (Mafart <i>et al.</i> , 2002)	18.96	1.77	0.51
	Weibull +Tail (Albert and Mafart, 2003)	0.08	0.12	0.99
	Biphasic (Cerf, 1977)	4.49	0.95	0.88
Menu Item 4	Biphasic + Shoulder (Geeraerd <i>et al.</i> , 2005)	11.16	1.67	0.71

3.2. 1차 전압의 영향

2차 전압과 공기 공급량을 각각 15 kV와 4L/min으로 일정하게 유지한 플라즈마 공정에서, 1차 전압의 변화가 *R. Solanacearum*의 불활성화에 미치는 영향을 각각 Weibull+Tail 모델과 Log-linear+Shoulder+Tail 모델을 통해 조사해 보았으며, 그 결과를 각각 Table 3과 4에 나타내었다.

먼저, Weibull+Tail 모델에 불활성화 실험 결과를 적용시켜 본 결과(Table 3), 표현되는 parameter들은 $\text{Log}_{10}(N_0)$, $\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$, δ , p 등 4가지였다. $\text{Log}_{10}(N_0)$ 은 초기 *R. Solanacearum*의 개체수에 Log를 취한 값으로 5.70에서 6.03의 비교적 균일한 값을 나타냄으로써 초기 미생물 농도가 일정하게 유지된 상태에서 실험이 이루어졌다는 것을 알 수 있었다. $\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$ 는 최종 *R. Solanacearum*의 개체수에 Log를 취한 값으로 30 V의 낮은 1차 전압에서는 1.29로 비교적 높게 유지됨으로써 불활성화가 완벽하게 발생하지는 않는다는 것을 알 수 있었고, 60 V에서 160 V로 증가시킴에 따라 $\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$ 는 0.83에서 0.53으로 감소되었으며, 30 V의 경우에 비해 160 V일 때 0.7Log 이상의 불활성화 향상을 나타내었다.

δ 는 *R. Solanacearum*의 개체수가 1/10로 감소할 때의 초기 시간으로서 30 V에서는 46.59초였으나 1차 전압을 증가시킴에 따라 δ 는 감소하여 160 V에서 18.46초로서 1/3로 감소하였다. 이는 1차 전압을 증가시킴에 따라 *R. Solanacearum*의 불활성화 속도가 증가한다는 것을 의미하며 불활성화 속도를 수치적으로 표현한 것으로 볼 수 있다. 특히 80 V와 100 V일 때의 값이 10초 이상의 큰 차이를 나타내는 것으로 보아 *R. Solanacearum*의 불활성화를 위해서는 100 V 이상의 전압이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 100 V 이상으로 1차 전압을 증가시켰을 때 δ 값은 그다지 큰 증가치를 나타내지 않음으로써 100 V 이상에서 불활성화 속도는 크게 증가하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

p 는 불활성화 곡선의 모양을 나타내는데, 본 실험 조건에서는 모두 $p > 1$ 의 조건을 만족함에 따라 볼록한 곡면의 형태로 불활성화가 발생한다는 것을 알 수 있었고, 이는 불활성화에 대한 지체기가 발생한다는 것을 의미한다. 1차 전압을 증가시킴에 따라 p 값은 감소하는 경향을 나타내어 지체기가 감소한다는 것을

알 수 있었다. 특히 30~80 V 구간에서는 1차 전압을 증가시킴에 따라 p 값의 감소가 급격하였으나, 100 V 이상에서는 완만한 p 값의 감소를 나타내었다.

Table 3. Effect of the first voltage on the parameters of Weibull+Tail model

Parameters	First Voltage (V)					
	30	60	80	100	120	160
$\text{Log}_{10}(N_0)$	5.70	5.81	5.80	5.97	6.03	5.84
$\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$	1.29	0.83	0.76	0.67	0.65	0.53
δ (sec)	46.59	39.70	31.83	21.24	20.20	18.46
p (-)	5.01	3.89	2.41	1.57	1.52	1.37

소독실험 결과를 Log-linear+Shoulder+Tail 모델에 적용시켜 본 결과 (Table 4), $\text{Log}_{10}(N_0)$ 는 1차 전압의 증가에 관계없이 5.61~6.28으로 거의 일정하게 나타났다. $\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$ 는 1차 전압이 증가함에 따라 감소하였으며, 30 V에서 60 V로 1차 전압을 증가시킬 때 $\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$ 는 1.19에서 0.84로 감소하여 가장 큰 $\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$ 의 변화를 나타내었으며, 100 V 이상에서는 큰 변화를 보이지 않았다. 이 결과는 Weibull+Tail 모델에 적용한 결과와 유사한 것으로 판단되었다. 비활성화속도를 의미하는 k_{max} 는 1차 전압 30 V에서 가장 낮은 0.15 sec^{-1} 를 보였으며, 60 V로 증가시킴에 따라 k_{max} 는 0.21 sec^{-1} 로 증가하였으나 60 V 이상의 1차 전압에서 k_{max} 는 거의 일정한 값을 나타내었다. 그러므로 *R. Solanacearum*를 불활성화시키기 위해서는 1차 전압을 최소 60 V 이상으로 유지해야 할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

지체기를 의미하는 SI 값을 살펴 본 결과, 80 V의 1차 전압까지는 비슷한 값을 나타내었으나, 100 V 이상으로 1차 전압을 증가시킴에 따라 SI는 급격한 감소를 보임으로써 지체기가 줄어드는 효율적인 불활성화를 유도하기 위해서는 100 V 이상의 1차 전압이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 이는 Weibull+Tail 모델에서 1차 전압의 변화에 따른 δ 의 변화 경향과 비슷한 것으로 판단되었다.

Table 4. Effect of the first voltage on the parameters of Log-linear+Shoulder+Tail model

Parameters	First Voltage (V)					
	30	60	80	100	120	160
Log10(N ₀)	6.28	5.61	6.22	5.95	6.15	5.92
Log10(N _{res})	1.19	0.84	0.76	0.66	0.64	0.53
k _{max} (1/sec)	0.15	0.21	0.21	0.21	0.22	0.23
SI (sec)	9.88	9.9	9.94	8.17	7.91	6.41

3.3. 2차 전압의 영향

1차 전압과 공기 공급량을 각각 100 V와 4 L/min으로 일정하게 유지한 조건에서 2차 전압을 각각 4, 7.5, 15 kV로 변화시키면서 실험한 결과를 Weibull+Tail 모델과 Log-linear+Shoulder+Tail 모델에 적용시켜 보았으며, 그에 따라 생성되는 parameter들을 정리하여 Table 5에 나타내었다.

먼저 실험결과를 Weibull+Tail 모델에 적용시켜 본 결과, Log10(N₀)는 비교적 일정한 값을 나타내었으나, 4 kV와 7.5 kV에서의 Log10(N_{res}) 값이 음의 값을 나타내었다. GlnaFiT 통계프로그램에서 Log10(N_{res}) 값이 음의 값으로 나타난다는 것은 실험 데이터와의 신뢰도가 매우 떨어진다는 것을 의미하며(Geeraerd 등, 2005), 이 조건에서의 표준편차 값도 Log10(N_{res}) 값 이상으로 높게 표현됨으로써 Weibull+Tail 모델에 대한 적용이 어렵다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 4 kV와 7.5 kV에서는 플라즈마의 형성이 적음으로써 *R. Solanacearum*의 불활성화가 원활하게 발생하지 못한 것으로 판단되고, 본 조건의 실험결과와는 다른 모델에 적용시켜야 할 필요성이 있었다. 15 kV의 실험 조건에서는 16초의 δ 값과 1.27(블록면)의 p 값을 나타내어 유효하였다.

Log-linear+Shoulder+Tail 모델에서도 4 kV 실험 조건에서의 SI 값이 음의 값을 나타냄으로써 모델의 적용성이 적절하지 않다는 것을 알 수 있었다. 2차 전압을 7.5 kV에서 15 kV로 증가시킴에 따라 k_{max}는 0.13 sec⁻¹에서 16 sec⁻¹으로 크게 증가하였고 SI은 3.62에서 0.68로 감소함에 따라 비불활성화속도는 크게 증가하고 지체기는 크게 감소하는 것으로 나타났다.

위 결과를 토대로 볼 때, 2차 전압의 크기는 *R. Solanacearum*의 불활성화에 미치는 영향이 매우 크며, 원활한 불활성화를 위해서는 15 kV의 2차 전압이 필요하다는 것을 모델 적용을 통해 알 수 있었다.

Table 5. Effect of the second voltage on the parameters of Weibull+Tail model and Log-linear+Shoulder+Tail model

Parameters	Weibull+Tail model			Log-linear+Shoulder+Tail model		
	Second voltage (kV)			Second voltage (kV)		
	4	7.5	15	4	7.5	15
Log10(N ₀)	6.83	6.45	6.38	6.83	6.41	6.45
Log10(N _{res})	-70.3	-111.54	0.68	5.16	4.48	0.68
δ (sec)	0.6	4.13	16			
p (-)	0.09	0.19	1.27			
k _{max} (1/sec)				0.11	0.13	16
SI (sec)				-12.26	3.62	0.68

3.4. 공기 유량의 영향

*R. Solanacearum*의 불활성화에 미치는 공기 유량의 영향을 조사하기 위하여, 1차 전압과 2차 전압을 각각 100 V와 15 kV로 일정하게 유지한 상태에서 공기 유량을 1~5 L/min으로 변화시키면서 불활성화 실험을 실시한 실험결과를 Weibull+Tail 모델과 Log-linear+Shoulder+Tail 모델에 적용한 결과를 각각 Table 6과 7에 나타내었다.

Weibull+Tail 모델에 실험 결과를 적용시킨 결과, Log10(N₀)는 실험 전 범위에서 6~7.08 정도로 큰 변동이 없이 적용되었으나, 공기 유량을 증가시킴에 따라 Log10(N_{res})는 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 공기 유량을 1 L/min에서 2 L/min으로 변화시킴에 따라 Log10(N_{res})는 각각 2.95에서 0.96으로 2Log 정도의 미생물 개체수의 큰 감소를 나타내었다. 그러므로 본 실험조건에서 *R. Solanacearum*를 불활성화시키기 위해서는 최소 2 L/min 이상의 공기 유량이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 4 L/min의 공기 유량에서 Log10(N_{res})는 가장 낮은 값인 0.42를 나타냄으로써 4 L/min의 공기 유량을 유지하는 것이 가장 높은 미생물 불활성화 효율을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었

다. δ 와 p 값들도 공기 유량이 증가할수록 감소하였으며, 4 L/min에서 가장 낮은 값을 나타냄으로써 4 L/min의 공기유량에서 가장 높은 미생물 불활성화 속도를 나타낸다는 것도 알 수 있었다.

Table 6. Effect of the air flow rate on the parameters of Weibull+Tail model

Parameters	Air flow rate (L/min)				
	1	2	3	4	5
Log10(N_0)	6.51	6	6.21	7.08	6.98
Log10(N_{res})	2.95	0.96	0.97	0.42	0.66
δ (sec)	39.46	32.16	34.111	20.79	26.34
p (-)	3.13	2.43	2.81	1.72	2.1

실험 결과를 Log-linear+Shoulder+Tail 모델에 적용시켜 보았을 때, Log10(N_0)는 6.28~7.11의 비교적 일정한 값을 나타내었고, Log10(N_{res})는 4 L/min에서 가장 낮은 0.42 값을 나타냄으로써 Weibull+Tail 모델과 비슷한 경향을 나타내었다. 비불활성화 속도를 의미하는 k_{max} 값은 4 L/min에서 최댓값을 나타내었고, 지체기를 의미하는 SI 값은 4 L/min의 공기 유량에서 최소인 13.65 sec를 나타내었다.

Table 7. Effect of the air flow rate on the parameters of Log-linear+Shoulder+Tail model

Parameters	Air flow rate (L/min)				
	1	2	3	4	5
Log10(N_0)	6.48	6.28	6.41	7.11	7.03
Log10(N_{res})	2.95	0.96	0.97	0.42	0.66
k_{max} (sec ⁻¹)	0.15	0.22	0.26	0.3	0.29
SI (sec)	15.38	14.04	19.49	13.65	17.63

3.5. pH의 영향

pH의 변화가 *R. Solanacearum*의 불활성화에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 1차 전압 100 V, 2차 전압 15 kV, 공기 유량 4 L/min인 조건에서 초기 pH를 3, 7, 11로 변화시키면서 실험한 결과를 Weibull+Tail

모델과 Log-linear+Shoulder+Tail 모델에 각각 적용하여 나타난 parameter들의 값을 Table 8에 나타내었다.

Log10(N_0)의 경우에는 양 모델 모두 거의 일정한 값을 나타내었으나, Log10(N_{res})의 경우에는 pH 3의 경우에서 가장 낮은 값을 나타냄으로써 pH 3에서 미생물 불활성화 효율이 가장 높다는 것을 알 수 있었다. Weibull+Tail 모델에서 δ 와 p 의 값은 pH 3에서 가장 높게 나타남으로써 불활성화 속도도 가장 빠르다는 것을 알 수 있었으나, 그 속도는 pH 7과 11의 결과와 비교할 때 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. Log-linear+Shoulder+Tail 모델에서도 pH 3에서 가장 높은 k_{max} 값과 가장 낮은 SI 값을 나타냄으로써 불활성화 속도가 가장 빠르다는 것을 알 수 있었으나, 그 차이는 크지 않았다.

Table 8. Effect of pH on the parameters of Weibull+Tail model and Log-linear+Shoulder+Tail model

Parameters	Weibull+Tail model			Log-linear+Shoulder+Tail model		
	pH (-)			pH (-)		
	3	7	11	3	7	11
Log10(N_0)	6.91	7.25	7.34	6.63	7.32	7.39
Log10(N_{res})	0.78	1.65	1.61	0.78	1.65	1.60
δ (sec)	22.95	18.27	17.03			
p (-)	1.83	1.36	1.36			
k_{max} (sec ⁻¹)				0.33	0.22	0.24
SI (sec)				5.03	7.14	7.31

4. 결론

본 연구에서는 수중 플라즈마 공정을 이용한 *Ralstonia Solanacearum* 불활성화 실험 결과를 Microsoft Excel의 추가 기능인 GInaFiT tool을 사용하여 9가지의 경험적 소독 모델들에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 표면상으로는 9가지 모델 중 Log-linear+Tail 모델, Log-linear+shoulder+Tail 모델, Weibull+Tail 모델들이 가장 적합한 모델로 나타났다.

- 2) SSE, RMSE, r^2 를 근거로 판단해 볼 때, SSE와 RMSE이 가장 작은 값으로 표현된 Weibull+Tail 모델이 본 실험 결과에 가장 적합하였으며, 다음으로는 Log-linear+Shoulder+Tail 모델이 적합하였다.
- 3) 1차 전압이 불활성화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Weibull+Tail 모델에 불활성화 실험 결과를 적용시켜 본 결과, $\text{Log}_{10}(N_0)$, $\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$, δ 및 p 값의 변화를 관찰할 수 있었으며, 1차 전압이 증가할수록 $\text{Log}_{10}(N_{\text{res}})$ 값이 감소함으로써 소독 효율이 증대되었고, 1차 전압이 증가할수록 δ 와 p 의 값이 감소함으로써 소독 속도가 증가하였다. *R. Solanacearum*의 원활한 불활성화를 위해서는 100 V 이상의 1차 전압이 필요하였다.
- 4) Log-linear+Shoulder+Tail 모델에 적용시켜 본 결과, 소독 효율적인 측면에서 Weibull+Tail 모델에 적용한 결과와 유사하게 나타났다. 비불활성화 속도를 근거로 할 때, *R. Solanacearum*를 불활성화시키기 위해서는 1차 전압을 최소 60 V 이상으로 유지해야 할 필요가 있었다. 지체기가 줄어드는 효율적인 불활성화를 유도하기 위해서는 100 V 이상의 1차 전압이 필요하였다.
- 5) 2차 전압 영향의 실험결과를 두 가지 모델에 적용시켜 본 결과, 4 kV와 7.5 kV에서는 만족한 말한 일치 결과를 얻지 못하였으므로 적어도 15 kV 이상의 2차 전압이 필요하였다
- 6) 공기 유량의 영향을 살펴 본 결과, 두 모델 모두 4 L/min의 공기유량에서 가장 높은 불활성화 효율과 불활성화 속도를 나타내었다.
- 7) 두 모델 모두, pH 3인 조건에서 가장 높은 불활성화 효율과 불활성화 속도를 얻을 수 있다는 것을 각 소독 모델의 parameter들의 변화를 통해 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 한국연구재단의 기초연구사업(일반연구지원사업, 기본연구 유형II, 과제번호: 2010-0020916)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김동석, 박영식, 2011, 수처리용 유전체장벽 플라즈마 반응기에 대한 기초 연구, 한국환경과학회지, 20(5), 623-630.
- 김창원, 김성기, 윤태일, 유충호, 2004, 환경미생물학, 동화기술, 103-114.
- 박영식, 김동석, 2011, 전기분해공정을 이용한 *E. coli* 소독에 미치는 인공하수 수질의 영향, 한국환경과학회지, 20(9), 1115-1124.
- 정연정, 2006, 오존과 UV를 이용한 복합(sequential or combined) 소독 공정의 소독 효율 평가: 지표 미생물의 불활성화 연구, 석사학위 논문, 연세대학교.
- 조민, 윤제용, 2005, 미생물의 불활성화와 소독모델, 첨단환경기술, 6, 108-115.
- Albert, I., Marfart, P., 2005, A modified Weibull model for bacterial inactivation, International Journal of Food Microbiology, 100, 197-211.
- Baranyi, J., Roberts, T. A., 1994, A dynamic approach to predicting bacterial growth in foods, International Journal of Food Microbiology, 23, 277-294.
- Cerf, O., 1977, A review. Tailing of survival curves of bacterial spores, Journal of Applied Microbiology, 42, 1-19.
- Cho, M., Chung, H. M., Yoon, J. Y., 2003, Quantative evaluation of the synergistic sequential inactivation of *Bacillus subtilis* spores with ozone followed by chlorine, Environ. Sci. Technol., 37, 2134-2138.
- Facile, N., Barbeau, B., Prevost, M., Koudjonou, B., 2000, Evaluating bacterial aerobic spores as a surrogate for *Giardia* and *Cryptosporidium* inactivation by ozone, Wat. Res., 34(12), 3238-3246.
- Geeraerd, A. H., Herremans, C. H., Van Impe, J. F., 2000, Structural model requirement to describe microbial inactivation during a mild heat treatment, International Journal of Food Microbiology, 59, 185-209.
- Geeraerd, A. H., Valdramidis, V. P., Van Impe, 2005, GInaFiT, a freeware tool assess non-log-linear microbial survivor curves, International Journal of Food Microbiology, 102, 95-105.
- Larson, A., Marinas, B. J., 2003, Inactivation of *Bacillus subtilis* spores with ozone and monochloramine,

- Wat. Res., 37(4), 833-844.
- Lee, J. S., Choi, J. H., Seo, S. T., Han, K. S., Park, J. H., Jang, H. I., 2005, Control of tomato wilt disease by amending pH of nutrient solution in hydroponic system, Res. Plant Dis., 11(2), 193-197.
- Mafart, P., Couvert, O., Gailard, S., Leguerinel, I., 2002, On calculating sterility in thermal preservation methods: application of the Weibull frequency distribution model, International Journal of Food Microbiology, 72, 107-113.
- McMeekin, T. A., Olley, J. N., Ross, T., Ratkowsky, D. A., 1993, Predictive microbiology: theory and application, Research Studies Press Ltd., John Wiley & Sons, New York.
- Rosso, L., Lobry, J. R., Bajard, S., Flandrois, J. P., 1995, Convenient model to describe the combined effects of temperature and pH on microbial growth, Applied and Environmental Microbiology, 61, 610-616.
- Van Boekel, M. A. J. S., 2002, On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells, International Journal of Food Microbiology, 74, 139-159.
- Van Impe, J. F., Nicolai, B. M., Schellekens, M., Martens, T., De Baerdemaeker, J., 1995, Predictive microbiology in a dynamic environment: A system theory approach, International Journal of Food Microbiology, 25, 227-249.