

ORIGINAL ARTICLE

플라즈마 공정을 이용한 고추역병균(*Phytophthora capsici*) 불활성화 모델의 적용

김동석 · 박영식^{1)*}

대구가톨릭대학교 환경과학과, ¹⁾대구대학교 기초교육대학

Application of Inactivation Model on Phytophthora Blight Pathogen (*Phytophthora capsici*) using Plasma Process

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

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

¹⁾DU University College, Daegu University, Daegu 712-714, Korea

Abstract

Ten empirical disinfection models for the plasma process were used to find an optimum model. The variation of model parameters in each model according to the operating conditions (first voltage, second voltage, air flow rate, pH, incubation water concentration) were investigated in order to explain the disinfection model. In this experiment, the DBD (dielectric barrier discharge) plasma reactor was used to inactivate *Phytophthora capsici* which cause wilt in tomato plantation. Optimum disinfection models were chosen among ten 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 models were shown as Log-linear+Tail model, Double Weibull model and Biphasic model. Three models were applied to the experimental data according to the variation of the operating conditions. In Log-linear+Tail model, $\text{Log}_{10}(N_0)$, $\text{Log}_{10}(N_{res})$ and k_{max} values were examined. In Double Weibull model, $\text{Log}_{10}(N_0)$, $\text{Log}_{10}(N_{res})$, α , δ_1 , δ_2 , p values were calculated and examined. In Biphasic model, $\text{Log}_{10}(N_0)$, f , k_{max1} and k_{max2} values were used. The appropriate model parameters for the calculation of optimum operating conditions were k_{max} , α , k_{max1} at each model, respectively.

Key words : Disinfection model, DBD process, *Phytophthora capsici*, Microsoft Excel, GInaFiT, Empirical model

1. 서론

흙을 이용하는 토경재배와 달리 물을 이용하는 수경(양액)재배에서는 수질을 세밀하게 관리할 수 있으므로 높은 생산성과 품질향상 등의 장점이 있으나, 병원성 미생물이 침투하게 되면 빠르게 확산되는 단점이 있어 재이용하지 않고(영)양액을 버리는 방법으로 운전하는 것

이 일반적이다(Baek et al., 2012a). 또한, 양액재배에서 사용된 후 폐기되는 양액은 다량의 질소와 인을 함유하고 있기 때문에 수계에 배출될 경우 지하수나 토양오염 또는 호수나 하천의 부영양화를 초래할 수 있다. 그러므로 양액을 소독하여 병원성 미생물을 불활성화시켜 양액을 순환시킬 수 있다면, 양액 생산 비용을 절감할 수 있고 양액 폐기에 따른 수질오염을 막을 수 있기 때문에 순환

Received 17 August, 2015; Revised 17 August, 2015;

Accepted 15 October, 2015

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

Daegu University, Daegu 712-714, 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.

식 양액재배 기술 개발에 대한 관심이 매우 크다(Baek et al., 2012a; No, 2003).

국내의 경우 수경재배에서 순환식 양액재배의 비율이 낮는데, 이는 초기 설치비가 비순환식에 비하여 30% 정도 비싸고 순환식 양액재배에 필요한 작물별 배양액 조성과 소독 기술 등과 같은 기반기술 조성이 미흡하기 때문인 것으로 알려져 있다(Nam, 2004). 일반적인 양액재배는 미생물의 조성이 단순하고 근권 완충력이 낮기 때문에 위조병원균(*Fusarium* sp.), 입고병원균(*Pythium* sp.), 역병원균(*Phytophthora* sp.) 및 묘갈록병원균(*Rhizoctonia* sp.) 등의 유해한 병원성 미생물이 발생하여 양액과 더불어 순환되면 병원균이 급속히 확산될 수 있는 위험성이 항상 내포되어 있다(Cho et al., 2000; Price and Nolan, 1984). 또한, 근권의 배지 성질이 물리·화학적으로 균일할 뿐만 아니라, 병원균이 양액 순환과 더불어 근권 완충능이 낮은 모든 양액재배 작물의 뿌리에 전염되어 급속히 발병되는 것으로 알려져 있다. 뿌리 전염성 병원균으로 인한 피해는 고품 배지보다는 비고형 배지에서 크고, 비순환식 보다는 순환식 양액재배에서 더 큰 것으로 보고되고 있어 이에 대한 대책으로 적절한 소독기술의 개발이 절대적으로 필요하다(Cho et al., 2000; Runia, 1994).

이러한 양액의 소독방법으로는 자외선, 여과, 광촉매 등에 의한 물리적 방법과 오존, 무기 금속이온 및 소독제 등에 의한 화학적 방법이 있으나(Chung et al., 2010), 이들 재래식 소독방법은 처리속도가 느리거나 유지관리가 어려운 등의 단점이 있어 효과적인 새로운 소독방법에 대한 필요성이 대두되고 있다(Lee et al., 2006). 최근 환경 분야에 적용된 바 있는 저온 수증 플라즈마 공정은 H_2O_2 와 O_3 등과 같은 화학적 활성종, 라디칼 및 다양한 산화제 등이 생성되는 것으로 알려져 있는데(Joshi et al., 1995; Sugiarto et al., 2003), 이들 화학종들의 높은 산화력을 이용하여 난분해성 물질의 산화와 미생물의 불활성화 효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다(Baek et al., 2012b).

여러 소독기술을 산업화시키기 위해서는 소독모델의 개발이 절대적으로 필요하다. 수증 미생물을 불활성화시키는 화학소독제들을 활용하는 경우, 소독에 영향을 미치는 소독제 농도, 접촉시간, 온도 등과 같은 인자들의 특성을 포함하는 다양한 소독 모델들이 개발되고 있다

(Baek et al., 2012a). 소독 모델은 Chick에 의해 최초 제안된 이후로, 일정한 소독제 농도에서 박테리아와 화학소독제 사이의 반응을 일차 이분자 화학 반응으로 분석해서 소독 모델을 제안하는 것이 일반적이다(Kim et al., 2003). 대부분의 소독 모델에서는 미생물의 불활성화를 표현하기 위하여 소독제 농도와 소독제-미생물간의 접촉 시간에 대한 상관관계가 필요하다(Facile et al., 2000). 그러나 시간에 따라 소독제 농도의 변화나 살아있는 미생물 농도의 변화가 연속적으로 발생함으로써 기존의 소독 모델을 그대로 적용하는 것은 곤란하였다.

그러므로 본 연구에서는 수증 플라즈마 공정을 이용한 고추 역병균인 *Phytophthora capsici* 불활성화 실험을 통하여, 시간에 따른 미생물 개체수의 변화를 여러 인자들(1차 전압, 2차 전압, 공기 유량, pH)의 변화에 따라 관찰하고, 그 결과들을 여러 연구자들이 문헌에서 보고하고 있는 경험적 소독 모델들(Baranyl and Roberts, 1994; Geeraerd et al., 2000; McMeekin et al., 1993; Rosso et al., 1995; Van Impe et al., 1995)에 적용하여 수증 플라즈마 소독 공정에 가장 적합한 최적의 소독 모델을 조사하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료 및 실험방법

실험에 사용된 유전체 방전 플라즈마 반응기는 회분식으로 운전할 수 있도록 제작되었으며 전체 반응조 용적 중 유효용적은 1 L이었다(Fig. 1). 반응기 시스템은 방전 전극, 유전체인 석영관, 접지 전극 및 산기관으로 이루어진 플라즈마 반응기, 슬라이드와 네온트랜스로 이루어진 전원 공급장치 및 공기 펌프와 유량조절장치로 이루어진 공기 공급장치로 이루어져 있다. 유전체는 두께가 1 mm, 내경이 7 mm인 석영관을 사용하였으며, 방전 전극과 접지 전극은 티타늄을 사용하였다. 전원 장치로 2차 전압을 15 kV까지 증가시킬 수 있고 주파수가 20 kHz인 네온트랜스를 이용하였다(Kim and Park, 2012b).

실험에 사용된 미생물은 고추 역병균인 *Phytophthora capsici* (KACC 40483)로 농촌진흥청 미생물 은행으로부터 분양받아 실험에 사용하였다. *P. capsici*는 PDA 배지(potato dextrose agar)에 접종하여 3일 동안 배양시킨 뒤 균총의 선단에서 직경 5 mm의 균사조각을 떼어 내어

V8 juice agar에서 접종한 뒤 25 °C의 암 상태에서 1주일 간 배양한 후 공중균사를 제거하고 25 °C의 광 상태에서 3일간 배양하였다. 멸균증류수를 부어 배지 상에 형성된 *P. capsici*의 유주자포자낭을 수확하여 현탁액을 확보한 후 실험에 사용하였다.

소독에 미치는 배양액 농도에 관한 실험은 일본야채 시험장 표준액(NO_3^- -N 16.0, NH_4^+ -N 1.3, PO_4^{3-} -P 4.0, K^+ 8.0, Ca^{2+} 8.0, Mg^{2+} 4.0 me/L)을 기준으로 제조하여 실험하였다(Kim and Park, 2012a).

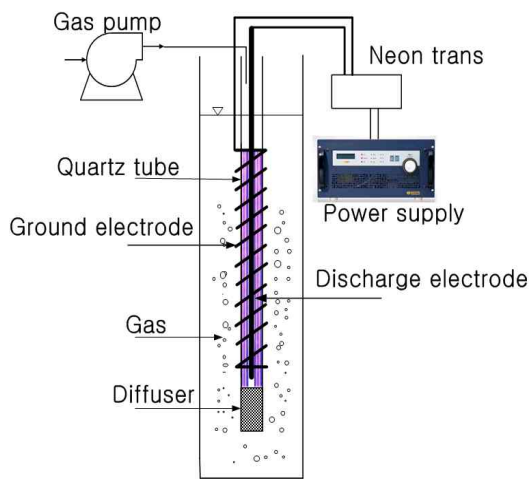


Fig. 1. Schematic diagram of dielectric barrier discharge (DBD) plasma reactor.

2.2. 분석 및 측정

실험방법으로는 균 stock 용액 1 mL를 1 L의 반응기에 넣고 초기 미생물 농도를 4.14×10^3 CFU/mL로 설정한 다음, 소독 실험을 수행하여 일정 시간 간격으로 시료 1 mL를 채취하였다. 균수의 측정은 주입평판법에 의해 클린 벤치에서 이루어졌다. 실험 오차를 줄이기 위해 1개의 시료당 5개의 평판을 만들어 사용하였으며, 시료 채취 후에는 수중에 잔존하는 산화제에 의해 지속적인 소독이 진행되는 것을 막기 위해 중화제(neutralizer, 14.6% sodium thiosulphate와 10% sodium thioglycolate) 10 μ L를 투입하여 연속적으로 희석하여 PDA 배지에 투입한 다음 25 °C로 유지되는 BOD 배양기에서 96시간동안 배양한 뒤 형성된 집락을 colony counter를 이용하여 계수하였다.

2.3. 소독 모델의 결정

Microsoft Excel의 추가 기능 중 하나인 GInaFiT (Geeraerd and Van Impe Inactivation model Fitting Tool) 프로그램을 이용하여 기존의 실험값과 비교하여 최적의 소독 모델을 선정하였다.

소독 모델의 결정에서 가장 중요한 점은 미생물의 불활성화에 대한 적합성과 적용가능성이다. 소독모델을 결정하는 방법 중 가장 간단하고 효과적인 방법은 SSE (Least Sum of Squared Error), RMSE (Root Mean Sum of Squared Error), 회귀결정계수(r^2)를 통계적으로 계산하여 사용하는 것이다(Baek et al., 2012a). SSE와 RMSE는 각각 측정치와 추정치의 잔차제곱합 또는 잔차 제곱평균을 이용하여 적용된 식의 적합성을 설명하며 0에 근접할수록 높은 정도를 나타낸다. 그러므로 본 연구에서는 여러 소독 모델들에 대하여 예측값과 실험값의 SSE와 RMSE가 가장 적게 나타나고 r^2 가 1에 가까울 때를 최적의 소독 모델로 결정하였다.

본 연구에 사용된 경험적 소독 모델은 크게 4가지로 구분할 수 있다(Table 1). 첫 번째는 미생물의 불활성화 곡선을 설명하는 log-linear 형태이다. 두 번째는 log-linear, log-linear 전에 지체기(shoulder)가 나타나는 유형, log-linear 감소 후에 꼬기(tailing) 현상이 나타나는 유형, 지체기+log-linear+꼬기가 동시에 나타나는 유형이 속하며, 경험적인 특성과 전형적인 1차 불활성화 속도식을 기초로 하고 있다. 세 번째는 Weibull 모형에 기초한 형태로 log-linear 유형, convex(볼록면)이 나타나는 형태, 2상의 불활성화 속도를 나타내는 형태로 정의된다. 네 번째는 log-linear 곡선, log-linear 전에 지체기(shoulder)가 나타나는 유형, concave(오목면) 곡선, convex(볼록면)/concave(오목면) 곡선이 나타난 후 꼬기 현상이 나타나는 유형들이 있다.

본 연구에서는 기존의 9가지 소독 모델에 2006년도에 새로 개발된 Double Weibull 모델을 추가한 10가지 소독 모델을 실험 결과에 적용시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소독 모델 결정

2차 전압 15 kV, 공기 공급량 4 L/min인 조건에서 실험한 소독 결과를 Microsoft Excel의 추가 기능인

Table 1. Model types and equations applied in this experiment

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

- N = the microbial cell density or number (CFU/mL)
- N₀ = initial microbial cell density (CFU/mL)
- N_{res} = the residual population density (CFU/mL)
- k_{max} = the first order inactivation rate constant (1/sec)
- S_I = a parameter representing the shoulder (sec)
- f = the fraction of the initial population major subpopulation (0~1)
- (1-f) = the fraction of the initial population in a minor subpopulation
- k_{max1}, k_{max2} = the specific inactivation rates of the two populations, respectively (1/sec)
- p = a shape parameter (-)
- δ = a scale parameter (sec), 1 and 2 indicate the different subpopulation
- t = time
- α = log₁₀(f/(1-f))

GInaFit tool을 사용하여 10가지 모델에 적용시킨 결과를 Table 2에 정리하였다.

10가지 모델 중 Menu item 1에 속하는 Log-linear

모델은 가장 고전적인 소독 모델으로서 SSE 값과 RMSE 값이 각각 0.3675와 0.6062로서 다른 소독모델들에 비해 값이 크고, r² 값이 0.8028으로 1에서 큰 차이

를 나타내어 본 실험의 소독 모델으로는 적합하지 않은 것으로 판명되었다.

Menu item 2에는 3가지 모델이 있는데, Menu item 1에 비해 비교적 낮은 SSE 값과 RMSE 값 및 1에 가까운 r^2 값을 나타내고 있으나, Log-linear+shoulder 모델은 높은 SSE 값과 RMSE 값으로 인해 부적합 모델로 판명하였다. Menu item 2의 2가지 모델(Log-linear+tail, Log-linear+shoulder+tail)은 비슷한 값을 나타내었는데, 본 연구에서는 2가지 모델 중 r^2 값에서는 큰 차이가 없었으나 SSE 값과 RMSE 값이 약간 더 낮은 Log-linear+tail 모델을 본 소독모델에 적합한 모델 중의 하나로 선정하였다.

Menu item 3에는 4가지 모델이 포함되어 있다. Baek et al.(2012a)의 연구에서는 3가지 모델이 제시되었으나, 본 연구에서는 Double Weibull 모델을 추가로 제시하였으며 이 식의 자세한 형태는 Table 1에 자세하게 제시되어 있다. Menu item 3의 4가지 모델 중 Weibull+tail과 Double Weibull 모델이 비교적 적합한 것으로 나타났으나, SSE 값과 RMSE 값이 더 낮고 r^2 값이 1에 더 가까운 Double Weibull 모델을 본 소독모델의 하나로 판명하였다.

Menu item 4에는 2가지 형태가 있는데, SSE 값과 RMSE 값 및 r^2 값을 비교해 본 결과 Biphasic 모델이 본 연구에 적합한 것으로 판명되었다.

그러므로 본 연구에서는 최종적으로 Log-linear+Tail 모델, Double Weibull 모델 및 Biphasic 모델을 본 연구의 최적 소독 모델로 선정하였다.

Baek et al.(2012a)은 플라즈마를 이용한 *R. Solanacearum* 불활성화 실험결과를 본 연구와 유사한 9가지 모델에 적용한 결과, Weibull+Tail 모델과 Log-linear+Shoulder+Tail 모델이 가장 적합하다고 발표한 바 있으나, *P. capsici*를 이용한 본 연구에서는 Baek et al.(2012a)과 유사하게 Weibull+Tail 모델과 Log-linear+Shoulder+Tail 모델도 적용 가능하지만, Log-linear+tail 모델과 Double Weibull 모델 및 Biphasic 모델이 더 적합한 것으로 판명되었다. Baek et al.(2012a)이 적용한 모델들과 본 연구에 적용된 모델들을 비교해 볼 때, 본 연구에 적용된 모델들에서는 shoulder가 없다는 것이 가장 큰 차이이다. 이는 불활성화 과정 중 초기에 형성되는 지체가 거의 없다는 것을 의미하는 것으로, 불

활성화 초기 과정 중 미생물의 소독제에 대한 저항성이 적다는 것으로 설명된다. 그러나 일반적으로 박테리아인 *R. Solanacearum* 보다는 균류인 *P. capsici*가 세포막이나 세포벽의 차이로 인하여 저항성이 클 것으로 예측하였으나(Mitchell, 1974), 본 연구의 결과는 예측과 상반되는 것으로 나타나, 이에 대한 보다 심층적인 추가 연구가 필요한 것으로 생각된다. 또한, 미생물의 종류에 따라 적용되는 소독모델도 변화할 수 있다는 것을 알 수 있었다. SSE, RMSE, r^2 값에 대한 *R. Solanacearum* 소독모델 적용결과와 본 연구의 *P. capsici* 소독모델 적용결과와 비교해 볼 때, 본 연구의 결과가 더 낮은 SSE와 RMSE 값을 나타내고 1에 가까운 r^2 값을 나타냄으로써 미생물의 종류에 따라 모델 적합성에도 약간의 차이가 발생한다는 것을 알 수 있었다.

Table 2에 정리된 Log-linear+Tail 모델, Double Weibull 모델 및 Biphasic 모델에 포함되어 있는 parameter들의 의미를 살펴보면 다음과 같다. 모든 모델에서 공통적으로 제시되는 $\log_{10}(N_0)$ 는 초기 미생물 농도에 \log 를 취한 값으로 본 실험에서는 대체적으로 동일한 미생물 농도로 실험하려고 시도하였으므로 $\log_{10}(N_0)$ 값은 비슷하였다.

Log-linear+Tail 모델에서 k_{max} 는 1차 불활성화 속도 상수를 나타내는 것으로 k_{max} 이 크다는 것은 불활성화 속도가 빠르다는 것을 의미한다. $\log_{10}(N_{res})$ 는 잔존하는 미생물 수에 \log 를 취한 값으로써 그 값이 클수록 잔존하는 미생물 농도가 높다는 것을 의미한다.

Double Weibull 모델에서 α 는 대(大)부분 모집단 비율과 소(小)부분 집단 비율의 비를 나타내는 것으로 값이 커진다는 것은 소부분 집단이 줄어들고 있다는 것을 의미한다. δ_1 과 δ_2 는 $p=1$ 일 때 각각 1번째와 2번째로 미생물 농도가 1/10로 감소할 때의 시간을 의미하며, 이 값이 클수록 미생물 농도가 1/10로 감소할 때의 소요 시간이 길어진다는 것을 의미한다. p 는 곡선의 모양을 나타내는 parameter로서 $p>1$ 일 때는 convex (볼록면), $p<1$ 일 때는 concave (오목면)를 의미한다(Geeraerd et al., 2005). Van Boekel (2002)와 Mafart et al.(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. 그러므로 Double Weibull 모델은 convex (볼록면), concave (오목면), linear, tailing 효과

Table 2. Statistical measures obtained when applying 10 models available in GlnaFiT on the experimental data

Model Type		SSE	RMSE	r ²
Menu Item 1	Log-linear	0.3675	0.6062	0.8028
Menu Item 2	Log-linear + Shoulder (Geeraerd <i>et al.</i> , 2000)	0.2178	0.4667	0.8994
	Log-linear + Tail (Geeraerd <i>et al.</i> , 2000)	0.0397	0.1993	0.9817
	Log-linear + Shoulder + Tail (Geeraerd <i>et al.</i> , 2000)	0.0423	0.2057	0.9837
Menu Item 3	Weibull (Mafart <i>et al.</i> , 2002)	0.1453	0.3811	0.9329
	Weibull, Fixed p-parameter (Mafart <i>et al.</i> , 2002)	0.4433	0.6658	0.7952
	Weibull +Tail (Albert and Mafart., 2003)	0.0368	0.1918	0.9858
	Double weibull (Coroller <i>et al.</i> , 2006)	0.0280	0.1672	0.9892
Menu Item 4	Biphasic (Cerf, 1977)	0.0280	0.1673	0.9892
	Biphasic + Shoulder (Geeraerd <i>et al.</i> , 2005)	0.0334	0.1827	0.9897

를 모두 설명할 수 있는 모델로 인식했다.

Biphasic 모델에서 f는 대(大)부분 모집단비율의 값을 나타내고 있고, k_{max1}과 k_{max2}는 각각 대(大)부분 모집단 비율과 소(小)부분 집단 비율의 1차 반응속도상수와 2차 반응속도상수 값을 의미한다.

- 3.2. 1차 전압의 변화에 따른 모델링 해석
- 2차 전압과 공기 공급량을 각각 15 kV와 2 L/min으로

로 일정하게 유지한 플라즈마 소독 공정에서, 1차 전압의 변화가 *P. capsici*의 불활성화에 미치는 영향에 대한 실험결과를 각각 Log-linear+Tail 모델, Double Weibull 모델 및 Biphasic 모델에 적용하였으며, 각 모델에서 변화하는 인자들을 정리하여 Table 3에 나타내었다.

Log-linear+Tail 모델에 *P. capsici*의 불활성화 실험 결과를 적용시켜 본 결과, 표현되는 parameter들은 k_{max},

Table 3. Effect of the first voltage on the parameters of Loglinear+tail, Double Weibull, Biphasic models

Para-meters	First Voltage (V)														
	Loglinear + tail model					Double Weibull model					Biphasic model				
	60	80	100	120	140	60	80	100	120	140	60	80	100	120	140
k _{max}	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08										
Log ₁₀ (N _{res})	2.11	1.54	0.77	0.37	0.29										
α						1.77	2.16	2.46	3.00	3.19					
δ ₁						53.16	44.29	33.47	28.88	25.12					
p						1.56	1.42	1.02	1.01	0.92					
Log ₁₀ (N ₀)	4.27	4.23	4.08	4.09	4.04	4.16	4.14	4.19	4.19	4.18	4.27	4.26	4.19	4.19	4.14
δ ₂						602	434	260	294	336					
f											0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
k _{max1}											0.05	0.06	0.07	0.08	0.08
k _{max2}											0.00	0.00	0.01	0.01	0.01

Table 4. Effect of the second voltage on the parameters of Loglinear+tail, Double Weibull, Biphasic models

Para-meters	Second Voltage (kV)								
	Loglinear + tail model			Double Weibull model			Biphasic model		
	4.5	7.5	15	4.5	7.5	15	4.5	7.5	15
k_{max}	0.09	0.10	0.12						
$\text{Log}_{10}(N_{res})$	1.05	0.68	0.35						
α				2.90	3.20	3.57			
δ_1				34.61	27.05	15.02			
p				1.63	1.24	0.81			
$\text{Log}_{10}(N_0)$	4.33	4.22	4.04	4.15	4.15	4.18	4.34	4.24	4.08
δ_2				629	618	821			
f							0.99	0.99	0.99
k_{max1}							0.09	0.10	0.12
k_{max2}							0.00	0.00	0.00

$\text{Log}_{10}(N_{res})$, $\text{Log}_{10}(N_0)$ 등 3가지였다. k_{max} 는 1차 불활성화 속도상수로서 1차 전압이 증가함에 따라 그 값이 증가하는 것으로 나타남으로써, 1차 전압이 증가할수록 *P. capsici*의 불활성화 속도가 빨라진다는 것을 알 수 있었다. 또한 k_{max} 값이 80 V 이하에서는 0.5 1/sec로 동일하게 나타나 변화가 없으므로 적절한 소독효과를 얻기 위해서는 80 V 이상의 1차 전압이 필요하다는 것을 알 수 있었다. $\text{Log}_{10}(N_{res})$ 는 최종 *P. capsici*의 개체수에 log를 취한 값으로 80 V의 낮은 1차 전압에서는 1.54로 비교적 높게 유지됨으로써 불활성화가 완벽하게 발생하지는 않는다는 것을 알 수 있었고, 100 V로 증가시킴에 따라 $\text{Log}_{10}(N_{res})$ 는 0.77으로 감소되었으며, 80 V의 경우에 비해 140 V일 때 1.25log 이상의 불활성화 증가를 나타내었다. $\text{Log}_{10}(N_0)$ 은 초기 *P. capsici*의 개체수에 log를 취한 값으로 4.27에서 4.04의 비교적 균일한 값을 나타냄으로써 초기 미생물 농도가 일정하게 유지된 상태에서 실험이 이루어졌다는 것을 의미한다.

Double Weibull 모델에 *P. capsici*의 불활성화 실험 결과를 적용시켜 본 결과, 표현되는 대표적인 parameter 들은 α , δ_1 , p , $\text{Log}_{10}(N_0)$, δ_2 등 5가지였다. 1차 전압이 증가함에 따라 α 값은 증가하는 것으로 나타남으로써, 1차 전압의 증가에 따라 저항성이 약한 소부분 집단 비율이 먼저 사멸하고 비교적 균일한 집단만 존재한다는 것

을 알 수 있다. 여기서 집단이란 동일 미생물 종내에서도 다른 성장 상태나 형태를 의미하는 것으로 생각해 볼 수 있다. δ_1 과 δ_2 가 제시되는 Double Weibull 모델은 2번의 급격한 미생물 농도 변화가 발생한다는 것을 기초로 만들어진 모델식이다. 1차 전압이 증가함에 따라 δ_1 과 δ_2 는 모두 감소하는 것으로 나타나, 1차 전압의 증가가 소독효과를 증가시킨다는 것을 알 수 있었다. 또한, 1차 전압을 80 V에서 100 V로 변화시킴에 따라 가장 뚜렷한 δ_1 과 δ_2 의 변화를 나타냄에 따라, 적절한 소독을 위해서는 80 V의 이상의 운전이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 이는 Log-linear+Tail 모델에서 얻은 결론과 유사하였다. 본 실험 조건에서는 대부분 $p > 1$ 의 조건을 만족하여 볼록한 곡면의 형태로 불활성화가 발생한다는 것을 알 수 있었는데, 이는 불활성화에 대한 지체기가 발생한다는 것을 의미한다. 그러나 140 V에서만 p 가 0.92로서 $p < 1$ 의 조건을 만족시킴으로써 오목한 곡면의 형태를 불활성화 형태를 나타내고 불활성화에 대한 지체기가 발생하지 않는다는 것을 의미한다. 1차 전압을 증가시킴에 따라 p 값은 감소하는 경향을 나타내어 지체기가 감소한다는 것을 알 수 있었고, 80 V에 비해 100 V에서는 p 값의 감소가 급격하게 나타남으로써 지체기없이 효과적인 소독이 이루어진다는 것을 알 수 있었다. $\text{Log}_{10}(N_0)$ 은 4.14에서 4.19의 비교적 균일한 값을 나타냄으로써 초기 미

Table 5. Effect of air flow rate on the parameters of Loglinear+tail, Double Weibull, Biphasic models

Para-meters	Air flow rate (L/min)														
	Loglinear + tail model					Double Weibull model					Biphasic model				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
k_{max}	0.06	0.07	0.09	0.12	0.12										
$\text{Log}_{10}(N_{res})$	1.06	0.32	0.33	0.35	0.28										
α						2.61	2.91	3.05	3.57	3.52					
δ_1						52.52	29.14	18.99	15.02	13.73					
p						1.46	1.03	0.85	0.81	0.80					
$\text{Log}_{10}(N_0)$	4.37	4.08	3.98	4.04	4.00	4.20	4.19	4.19	4.18	4.16	4.38	4.20	4.13	4.08	4.05
δ_2						417	253	259	820	582					
f											0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
k_{max1}											0.06	0.08	0.10	0.12	0.13
k_{max2}											0.00	0.01	0.01	0.00	0.00

생물 농도가 일정하게 유지된 상태에서 실험이 이루어졌다는 것을 알 수 있었다.

*P. capsici*의 불활성화 실험 결과를 Biphasic 모델에 적용시켜 본 결과, 얻을 수 있는 대표적인 parameter들은 $\text{Log}_{10}(N_0)$, f , k_{max1} , k_{max2} 등 4가지였다. $\text{Log}_{10}(N_0)$ 은 4.14에서 4.26의 비교적 균일한 값을 나타냄으로써 초기 미생물 농도가 일정하게 유지되었다는 것을 알 수 있었다. 1차 전압의 증가에 따라 f 값은 고정된 값을 나타냄으로써 주요 미생물 종의 변화는 없는 것을 알 수 있었다. 1차 전압의 증가에 따라 k_{max1} 값은 증가하는 것으로 나타나 1차 불활성화 속도가 증가한다는 것을 알 수 있었다. k_{max2} 값도 1차 전압의 증가에 따라 증가하였으나, 그 증가폭은 k_{max1} 에 비해 훨씬 적었으며 절대적인 값도 k_{max1} 에 비해 적은 것으로 나타났다. 이는 소독효과가 초기에는 크게 나타나고 시간이 경과될수록 잔류 소독제에 의한 불활성화 효과는 감소한다는 것을 의미한다.

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 각각 Log-linear+Tail 모델, Double Weibull 모델 및 Biphasic 모델에 적용시켰으며, 그에 따라 생성되는 parameter들을 정리

하여 Table 4에 나타내었다.

먼저 실험결과를 Log-linear+Tail 모델에 적용시켜 본 결과, 2차 전압의 증가에 따라 k_{max} 값은 증가하였고 $\text{Log}_{10}(N_{res})$ 값은 감소하는 경향을 나타냄으로써 2차 전압이 증가할수록 소독효과가 증가하여 *P. capsici*의 불활성화 속도가 증가하고 잔류하는 *P. capsici*의 농도가 감소한다는 것을 알 수 있었다. 이는 1차 전압의 효과와 유사하였다.

Double Weibull 모델에서 가장 중요한 인자로 인식되는 α , p , δ_1 , δ_2 값에 대해 알아보면, 2차 전압의 증가에 따라 α 값은 점진적으로 증가함으로써 저항성이 약한 소집단은 감소하는 것으로 나타났고, p 값이 점진적으로 감소하여 지체기가 감소함으로써 미생물의 저항성이 감소하고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한, 1차 전압의 증가에 따라 δ_1 이 감소함으로써 불활성화 속도가 증가한다는 것을 알 수 있었으나, 2차 불활성화를 의미하는 δ_2 가 불균일한 값을 나타내는 것으로 보아 2차 불활성화는 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다.

2차 전압의 증가에 따른 Biphasic 모델의 f , k_{max1} , k_{max2} 인자의 변화를 살펴보면, f 값은 0.99로 거의 일정한 값을 나타내어 주요 미생물 종의 변화는 없다는 것을 알 수 있었다. k_{max1} 은 증가함으로써 불활성화 속도가 증가한다는 것을 알 수 있었으며, k_{max2} 는 0으로 나타남으

Table 6. Effect of pH on the parameters of Loglinear+tail, Double Weibull, Biphasic models

Para-meters	pH (-)														
	Loglinear + tail model					Double Weibull model					Biphasic model				
	3	5	7	9	11	3	5	7	9	11	3	5	7	9	11
k_{max}	0.14	0.12	0.12	0.10	0.10										
$\text{Log}_{10}(N_{res})$	0.31	0.34	0.35	0.49	1.10										
α						3.46	3.49	3.57	3.50	2.88					
δ_1						13.03	13.99	15.02	18.76	25.26					
p						0.84	0.82	0.81	0.87	1.10					
$\text{Log}_{10}(N_0)$	4.05	4.04	4.04	4.09	4.22	4.19	4.18	4.18	4.19	4.19	4.12	4.08	4.08	4.12	4.23
δ_2						470	574	820	1099	782					
f											0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
k_{max1}											0.15	0.13	0.12	0.11	0.10
k_{max2}											0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

로써 2차 불활성화는 거의 없다는 것을 알 수 있었다.

위 3가지 모델을 통해서 알 수 있는 것은 2차 전압을 증가시키기에 따라 미생물의 저항성이 감소함으로써 불활성화 속도가 증가하고 잔존하는 미생물 농도는 감소한다는 것을 알 수 있었고 잔류하는 소독제에 의한 2차 불활성화는 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한 본 실험 범위에서는 2차 전압의 증가에 따라 불활성화 효과도가 계속 증가함으로써 최적의 2차 전압은 최대값인 15 kV로 나타났다.

3.4. 공기 유량의 영향

*P. capsici*의 불활성화에 미치는 공기 유량의 영향을 조사하기 위하여, 1차 전압과 2차 전압을 각각 100 V와 15 kV로 일정하게 유지한 상태에서 공기 유량을 1 L/min에서 5 L/min으로 변화시키면서 불활성화 실험을 실시한 결과를 Log-linear+Tail 모델, Double Weibull 모델 및 Biphasic 모델에 적용시켰다(Table 5).

Log-linear+Tail 모델에서 공기 유량을 증가시키기에 따라 불활성화 속도의 지표가 되는 k_{max} 는 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 4 L/min 이상의 공기 유량에서 k_{max} 값은 0.12 1/sec로 비슷한 값을 나타내어, 4 L/min 이상의 공기유량은 플라즈마 반응기의 산화제 생성에 미치는 영향에 큰 변화가 없어 불활성화속도 상수도 일정하게

나타난 것으로 볼 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 4 L/min의 공기 유량이 최적의 공기 유량 운전점으로 판단할 수 있었다.

Double Weibull 모델에서 α 값은 공기유량의 변화에 따라 점진적으로 증가함으로써 저항성이 약한 소집단은 줄어들고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한, 4 L/min과 5 L/min의 공기 유량에서 α 값은 각각 3.57과 3.52로 나타나 큰 변화가 없었다. 그러므로 α 값의 변화를 지표로 최적의 운전점을 4 L/min으로 도출할 수 있었다. δ_1 의 값은 공기유량의 증가에 따라 감소함으로써 불활성화속도가 증가한다는 것을 알 수 있었으나, 4 L/min의 이상의 공기유량에서는 δ_1 값은 감소 폭이 현저하게 감소하여 4 L/min이 최적의 공기 유량이라는 것을 다시 한 번 확인할 수 있었다. δ_2 값은 불규칙적인 변화를 보여 공기 유량과의 연관성을 관찰하기 어려웠다. p 값은 공기 유량의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내어 불활성화 형태가 변화한다는 것을 알 수 있었다. 특히, 1 L/min과 2 L/min에서는 $p > 1$ 으로 볼록 곡면 형태의 불활성화 형태가 나타나 지체기가 약간 있다는 것을 알 수 있었으며, 3 L/min 이상에서는 $p < 1$ 으로 오목 곡면의 형태로 변화하여 지체기가 거의 없다는 것을 알 수 있었다. 이러한 변화는 공기 유량의 증가에 따른 산화제 형성량의 증가에 기인하는 것으로 볼 수 있다. p 값의 변화를 관찰할 때, 최적의 공

Table 7. Effect of incubation water concentration on the parameters of Loglinear+tail, Double Weibull, Biphasic models

Para-meters	Incubation water concentration (times)								
	Loglinear + tail model			Double Weibull model			Biphasic model		
	0	1	3	0	1	3	0	1	3
k_{max}	0.12	0.12	0.10						
$\text{Log}_{10}(N_{res})$	0.25	0.35	0.38						
α				3.60	3.57	3.07			
δ_1				14.58	15.02	19.85			
p				0.83	0.81	0.92			
$\text{Log}_{10}(N_0)$	4.05	4.04	4.13	4.18	4.18	4.21	4.10	4.08	4.17
δ_2				632	820	545			
f							0.99	0.99	0.99
k_{max1}							0.13	0.12	0.11
k_{max2}							0.00	0.00	0.00

기유량은 3 L/min으로 볼 수 있으나, 앞의 다른 근거 자료로 볼 때 4 L/min의 공기유량을 최적 운전점으로 보는 것이 적절한 것으로 판단되었다. 그러므로 p 값은 불활성화의 지체기 발생 여부를 판단하는 데에는 적절하나, 최적의 운전점을 도출하는 인자로는 적절하지 못한 것으로 판단되었다.

Biphasic 모델에서 f 값과 k_{max2} 값은 공기 유량의 변화에 관계없이 일정한 값을 나타내어 큰 영향이 없는 인자로 판명되었다. 공기 유량을 증가시킴에 따라 k_{max1} 값은 증가하는 것으로 나타났으며 4 L/min 이상의 공기유량에서는 큰 변화가 없는 것으로 보아 4 L/min을 최적의 운전점으로 판단할 수 있었다.

그러므로 최적의 운전점을 판단하는 데 있어 Log-linear+Tail 모델에서는 k_{max} , Double Weibull 모델에서는 α 와 δ_1 , Biphasic 모델에서는 k_{max1} 이 가장 적절한 인자인 것으로 판명할 수 있었고, 각 모델에서의 최적 운전점은 동일한 것으로 나타났다.

3.5. pH의 영향

pH의 변화가 *P. capsici*의 불활성화에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 1차 전압 100 V, 2차 전압 15 kV, 공기 유량 4 L/min인 조건에서 초기 pH를 3, 5, 7, 9, 11로 변화시키면서 실험한 결과를 Log-linear+Tail 모델,

Double Weibull 모델 및 Biphasic 모델에 각각 적용시켜 나타난 인자들의 값을 Table 6에 나타내었다.

Log-linear+Tail 모델에서 $\text{Log}_{10}(N_0)$ 의 경우에는 거의 일정한 값을 나타내어 초기 미생물 농도의 변화는 거의 없다는 것을 알 수 있었으나, $\text{Log}_{10}(N_{res})$ 의 경우에는 pH 3의 경우에서 가장 낮은 값을 나타냄으로써 pH 3에서 미생물 불활성화 효율이 가장 높다는 것을 알 수 있었다. 또한, pH의 감소에 따라 k_{max} 값은 증가하여 pH를 감소시킬수록 불활성화 속도는 증가한다는 것을 알 수 있었으나, 본 결과에서는 pH 감소에 따른 지속적인 k_{max} 값의 증가가 관찰되어 최적의 운전점이 도출하기 곤란하였다.

Double Weibull 모델에서 pH의 감소에 따라 α 값은 증가하였으나, pH 9 이상에서는 큰 변화를 나타내지 못하여 최적의 운전점이 pH 9인 것으로 판단할 수 있었다. 그러나 δ_1 값은 pH 감소에 따라 계속 감소함으로써 최적의 운전점을 판단할 수 없었다. p 값은 pH 감소에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, pH 9 이하에서는 $p < 1$ 으로서 불활성화 형태의 변화가 발생하였다. δ_2 값은 불균일한 값을 나타내어 상관관계를 찾기 어려웠다.

Biphasic 모델에서 f 값과 k_{max2} 값은 pH의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내었다. k_{max1} 값은 pH의 감소에 따라 증가하는 것으로 나타나, pH 감소에 따라

불활성화 속도의 증가하며 k_{max1} 값은 pH의 변화에 따른 중요 변수가 된다는 것을 알 수 있었다.

3.6. 양액 농도의 영향

양액 농도가 *P. capsici*의 불활성화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1차 전압과 2차 전압을 각각 100 V와 15 kV로 고정하고 공기주입량을 4 L/min으로 일정하게 유지한 상태에서, 증류수, 기본 양액, 기본 양액의 3배 농도 양액을 이용하여 실험한 결과를 3가지 소독 모델에 적용하여 그 결과를 Table 7에 정리하였다.

Log-linear+Tail 모델에서 양액 농도가 증가할수록 k_{max} 값은 감소하고 $\log_{10}(N_{res})$ 는 증가하는 것으로 보아, 양액농도는 불활성화 속도와 불활성화 효과를 모두 감소시킨다는 것을 알 수 있었다. 이는 양액 성분이 플라즈마 반응 중 생성된 산화제와 반응함으로써 산화제 농도가 감소되고 양액 성분 중 콜로이드 성분들은 산화제에 대한 피난처로 작용하기 때문인 것으로 판단된다(Kim et al., 2003).

Double Weibull 모델에서 양액성분을 감소시킴에 따라 α 값은 감소하고 δ_1 값은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 α 값이 감소함으로써 소독효과가 줄어들고 있다는 것을 알 수 있고, δ_1 값이 증가함으로써 불활성화에 소요되는 시간이 증가함으로써 불활성화 속도도 감소한다는 것을 알 수 있었다. p 값과 δ_2 값은 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다.

Biphasic 모델에서 f 값과 k_{max2} 값은 양액 농도의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내었고, k_{max1} 값은 양액 농도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내어 불활성화 속도가 감소한다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 수중 플라즈마 공정을 이용하여 여러 가지 운전인자(1차 전압, 2차 전압, 공기 유량, pH, 양액 농도)를 이용한 *Phytophthora capsici* 불활성화 실험 결과를 Microsoft Excel의 추가 기능인 GInaFit tool을 사용하여 10가지의 경험적 소독 모델들에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 10 가지 모델 중 SSE, RMSE, r^2 를 근거로 가장 적합한 모델을 판단해 볼 때, SSE와 RMSE 값이 가장 적

고 r^2 값이 1에 가까운 모델은 Log-linear+Tail 모델, Double Weibull 모델 및 Biphasic 모델들이었다.

2) 미생물의 종류에 따라 적용되는 소독모델도 변화하였고 모델 적합성에도 약간의 차이가 발생하였다.

3) Log-linear+Tail 모델에서 최적 운전인자를 도출하기 위한 모델 인자는 k_{max} 값이었다.

4) Double Weibull 모델에서 최적 운전인자를 도출하기 위한 모델 인자는 α 값과 δ_1 값이었으나, α 값이 보다 적합한 모델 인자였다. p 값은 불활성화의 지체기 발생 여부를 판단하는 데에는 적절하나, 최적의 운전점을 도출하는 인자로는 적절하지 않았다.

5) Biphasic 모델에서 f 값과 k_{max2} 값은 거의 일정한 값을 나타냄으로써 k_{max1} 값이 최적의 운전인자를 도출하기 위한 모델 인자이었다.

감사의 글

본 연구는 대구가톨릭대학교 2014년 교내연구비(과제번호 20141015)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCE

- Albert, I., Marfart, P., 2005, A modified Weibull model for bacterial inactivation, Int. J. Food Microbiol., 100, 197-211.
- Baek, S. E., Kim, D. S., Park, Y. S., 2012a, Application of disinfection models on the plasma process, J. Environ. Sci., 21(6), 695-704.
- Baek, S. E., Kim, D. S., Park, Y. S., 2012b, Inactivation of *Ralstonia Solanacearum* using aquatic plasma process, 21(7), 797-804.
- 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, Tailing of survival curves of bacterial spores, J. Appl. Microbiol., 42, 1-19.
- Cho, J. Y., Seo, B. S., Chung, S. J., 2000, Present status and prospect of sterilization of nutrient solution for recycles hydroponics, Kor. J. Hort. Sci. Technol., 18(6), 890-899.
- Chung, S. W., Ha, Y. S., Lee, J. W., Park, J. M., Kwon, S. H., Lee, K. M., 2010, Development of a hydroponic

- recycle system using the visible light-reactive titanium dioxide photocatalyst for Sterilization of nutrient solution(I) - Determination of factors - . J. Biosystems Eng., 35(6), 420-425.
- Coroller, F. B., Gerbier, G., Stark, K. D. C., Grillet, C., Albina, E., Zientara, S., Roger, F., 2006, Performance evaluation of a competitive ELISA test used for Bluetongue antibody detection in France, Veterinary Microbiol., 118, 57-66.
- Facile, N., Barbeau, B., Prevost, M., Joudjonou, 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, Int. J. Food Microbiol., 59, 185-209.
- Geeraerd, A. H., Herremans, C. H., Van Impe, J. F., 2005, GlnaFIT, a freeware tool assess non-log-linear microbial survivor curves, Int. J. Food Microbiol., 102, 95-105.
- Joshi, A. A., Locke, B. R., Arce, P., Finney, W. C., 1995, Formation of hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and aqueous electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution, J. Hazard. Mater., 41, 3-30.
- Kim, C. W., Kim, S. K., Yun, T. I., Ryu, C. H., 2003, Environmental Microbiology, Dongwha Pub., 2nd eds., 103-114.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2011, Optimization of air-plasma and oxygen-plasma process for water treatment using central composite design and response surface methodology, J. Environ. Sci., 20(7), 907-917.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2012a, Change of hydroponic components by plasma treatment, J. Environ. Sci., 21(3), 363-368.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2012b, Inactivation of *Ralstonia Solanacearum* using aquatic plasma process. J. Environ. Sci., 21(7), 797-804.
- Lee, J. S., Han, K. S., Park, J. H., Cheong, S. R., Jang, H. I., 2006, Disinfection of *Phytophthora* spp. in recycling nursery irrigation water by ozone treatment, Res. Plant Dis., 12(3), 272-277.
- Mafart, P., Couvert, O., Gailard, S., Leguerinel, I., 2002, On calculating sterility in thermal preservation methods: application of the Weibull frequency distribution model, Int. J. Food Microbiol., 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.
- Mitchell, R., 1974, Introduction to Environmental Microbiology, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Nam, Y. I., 2004, Present status and further prospects for development of closed hydroponics in Koera, Kor. Res. Soc. Protected Hort., 17(1), 1-7.
- No, M. Y., 2003, Nutrient solution recycling in closed hydroponics, Kor. Res. Soc. Protected Hort., 16(2), 35-42.
- Price, T. V., Nolan, P. D., 1984, Incidence and distribution of *Pythium*, *Phytophthora* and *Fusarium* spp. in recirculating nutrient film hydroponic systems, Inter. Soc. Soil Cul., Proc., 523-531.
- 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, Appl. Environ. Microbiol., 61, 610-616.
- Runia, W. T., 1994, Disinfection of recirculation water from closed cultivation systems with ozone, Acta Hort., 361, 388-396.
- Sugiarto, A. T., Ito, S., Ohshima, T., Sato, M., Skalny, J. D., 2003, Oxidative decolorization of dyes by pulsed discharge plasma in water, J. Electrosts., 58, 135-145.
- Van Boeckel, M. A. J. S., 2002, On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells, Int. J. Food Microbiol., 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, Int. J. Food Microbiol., 25, 227-249.