

ORIGINAL ARTICLE

플라즈마 공정을 이용한 고추역병균(*Phytophthora capsici*) 불활성화에 관한 연구

김동석 · 박영식^{1)*}

대구가톨릭대학교 환경과학과, ¹⁾대구대학교 기초교육원

A Study on the Inactivation of Phytophthora Blight Pathogen (*Phytophthora capsici*) using Plasma Process

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

Abstract

Plasma reactor was used for the inactivation of *Phytophthora capsici* which is phytophthora blight pathogen in aquaculture. Effects of first voltage, second voltage, air flow rate, pH, incubation water concentration were examined. At the low 1st voltage, under 80 V, the lag phase was noticed within 30 sec, however, it was not shown over 100 V. The variation of optimum operation condition was not shown by the variation of microorganisms. However, the inactivation rate was different by the variation of species of microorganisms. The inactivation rate and efficiency were increased by the increase of 2nd voltage. The highest initial inactivation rate was shown at pH 3 and the rate was decreased by the increase of pH. The inactivation rate increased by the increase of air flow rate, however, it was shown as similar at the rate of 4 L/min and 5 L/min. The inactivation rate was distinctly decreased at the three times concentration of incubation solution comparing at the distilled water and basic incubation solution.

Key words : Inactivation, Plasma process, *Phytophthora capsici*, Operation factors

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(Baek 등, 2012a). 양액재배에서 사용된 후 폐기되는 배양액은 질소와 인을 함유하고 있기

때문에 수계에 배출될 경우 지하수나 토양오염 또는 호수나 하천의 부영양화를 초래할 수 있다. 그러므로 양액을 소독하여 순환시키면, 양액 생산 비용을 절감할 수 있고 양액 폐기에 따른 수질오염을 막을 수 있어 폐양액을 최대한 회수하여 재활용할 수 있는 순환식 양액재배 기술 개발에 대한 관심이 날로 증가하고 있다(Baek 등, 2012b; No, 2003).

국내의 경우 수경재배에서 순환식 재배의 비율이 낮

Received 30 July, 2014; Revised 1 September, 2014;

Accepted 3 September, 2014

*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

© 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.

은데, 이는 초기 설치비가 비순환식에 비하여 30% 정도 비싸고 순환식 재배에 필요한 작물별 배양액 조성이나 소독 기술 등과 같은 기반기술 조성이 미흡하기 때문인 것으로 알려져 있다(Nam, 2004). 양액재배는 미생물의 조성이 단순하고 근권 완충력이 낮기 때문에 위조병원균(*Fusarium sp.*), 입고병원균(*Pythium sp.*), 역병원균(*Phytophthora sp.*) 및 묘잘록병원균(*Rhizoctonia sp.*) 등의 유해한 병원성 미생물이 발생하여 양액과 더불어 순환되면 병원균이 급속히 확산될 수 있는 위험성이 항상 내포되어 있다(Cho 등, 2000; Price와 Nolan, 1984). 또한, 근권의 배지 성질이 물리화학적으로 균일할 뿐만 아니라 병원균이 양액 순환과 더불어 근권 완충능이 낮은 모든 양액재배 작물의 뿌리에 전염되어 급속히 발병되는 것으로 알려져 있다. 뿌리전염성 병원균으로 인한 피해는 고히 배지보다는 액상 배지에서 크고, 비순환식보다는 순환식 양액재배에서 더 큰 것으로 보고되고 있어 이에 대한 대책이 필요하다(Cho 등, 2000; Runia, 1994).

이러한 배양액의 소독법으로는 자외선, 여과, 광촉매 등에 의한 물리적 방법과 오존, 무기 금속이온 및 소독제 등에 의한 화학적 방법이 있다(Chung 등, 2010). 그러나 이들 재래식 소독 방법은 처리속도가 느리거나 유지관리가 어려운 등의 단점이 있어 효과적인 새로운 소독법에 대한 필요성이 대두되고 있다(Lee 등, 2006). 최근 환경 분야에서 활용되고 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 등, 1995; Sugiarto 등, 2003), 이들 화학종들의 높은 산화력을 이용하여 난분해성 물질의 산화와 미생물의 불활성화 효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다(Back 등, 2012b).

그러므로 본 연구에서는 수증 플라즈마 공정을 이용한 고추 역병원균인 *Phytophthora capsici* 불활성화 실험을 통하여, 시간에 따른 미생물 개체수의 변화를 여러 운전 인자들 (1차 전압, 2차 전압, 공기 유량, pH, 양액 농도)의 변화에 따라 관찰하여 각 운전인자들의 영향을 살펴보고 최적의 운전조건을 도출하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료 및 실험방법

실험에 사용한 유전체 방전 플라즈마 반응기는 회분식으로 제작하였으며 전체 반응조 중 유효용적은 1 L이 었다(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 전압이 15 kV이고 주파수가 20 kHz인 네온트랜스를 이용하였다(Kim과 Park, 2012b).

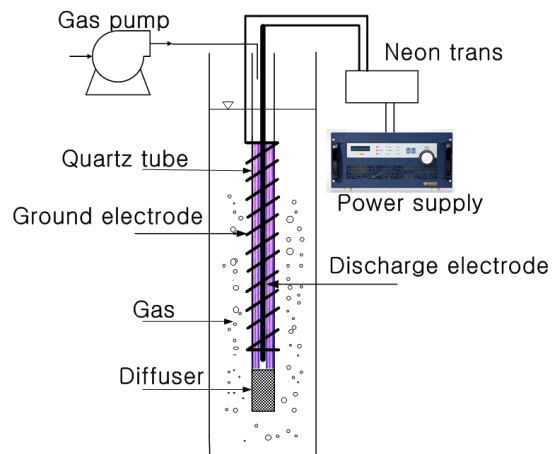


Fig. 1. Schematic diagram of dielectric barrier discharge (DBD) plasma reactor.

실험에 사용된 미생물은 고추 역병원균인 *Phytophthora capsici* (KACC 40483)로 농촌진흥청 미생물은행으로부터 분양받아 실험에 사용하였다. *P. capsici*는 PDA 배지(potato dextrose agar)에 접종하여 3일 동안 배양시킨 뒤 균 총의 선단에서 직경 5 mm의 균사조각을 떼어 내어 V8 juice agar에서 접종한 뒤 25°C의 암상태에서 1주일간 배양한 후 공중균사를 제거하고 25°C의 광상태에서 3일간 배양하였다. 멸균증류수를 부어 배지 상에 형성된 *P. capsici*의 유주자포자낭을 수확하여 현탁액을 확보한 후 실험에 사용하였다.

소독에 미치는 배양액 농도에 관한 실험 중 향후 식물 성장에 이용할 배양액은 일본야채시험장 표준액 기준($\text{NO}_3\text{-N}$ 16.0, $\text{NH}_4\text{-N}$ 1.3, $\text{PO}_4\text{-P}$ 4.0, K^+ 8.0, Ca^{2+} 8.0, Mg^{2+} 4.0 me/L)을 기준으로 제조하여 실험하였다 (Kim과 Park, 2012a).

2.2. 분석 및 측정방법

미생물 측정 방법으로는 균 stock 용액 1 mL를 1 L의 반응기에 넣고 초기 미생물 농도를 약 1.0×10^4 CFU/mL로 설정한 다음, 소독 실험을 수행하여 일정 시간 간격으로 시료 1 mL를 채취하였다. 균의 개체수 측정은 주입평판법에 의해 무균실에서 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 μL 를 투입하여 연속적으로 희석하여 PDA 배지에 투입한 다음 25°C로 유지되는 BOD 배양기에서 96시간동안 배양한 뒤 형성된 집락을 colony counter를 이용하여 계수하였다. 실험은 5회 실시하였고 평균값을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 1차 전압의 영향

1차 전압의 변화에 따른 *P. capsici*의 불활성화를 관찰하기 위하여, 2차 전압 15 kV와 공기 공급량 2 L/min인 조건에서 1차 전압을 60~140 V로 바꾸어가며 소독 실험을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

시간이 경과됨에 따라 살아있는 균체수가 감소하는 것으로 나타났으며, 180초(3분) 이후에는 살아있는 균체수가 일정하게 나타나 더 이상의 불활성화 효과는 없는 것으로 나타났다. 여기서 log N은 살아있는 균체수 N에 log를 사용한 값이다. 120 V 이상의 1차 전압에서는 180초 이후 대부분의 미생물이 불활성화 되었으나, 80 V 이하의 1차 전압에서는 180초 이후 살아있는 미생물이 잔존함에도 불구하고 지속적인 소독효과가 나타나지 않는 것으로 보아 80 V 이하의 1차 전압에서는 지속적인 불활성화 효과를 거둘 수 있는 화학소독제의 생성이 충분하지 않은 것으로 판단되었다. 이러한 불활성

화 경향은 수중 플라즈마 공정을 이용한 *Ralstonia Solanacearum*의 불활성 연구(Baek 등, 2012)에서도 유사하게 관찰된 바 있으나, 절대적인 불활성화율은 상당한 차이를 나타내는 것으로 보인다. 1차 전압 80 V, 시간 60초의 실험 조건에서 *R. Solanacearum*는 5 log (= 10^5 CFU/mL)를 나타내었으나, 본 실험의 *P. capsici*에서는 2 log (= 10^2 CFU/mL)의 낮은 불활성화량을 나타내었다. 동일한 실험 조건에 이러한 차이를 나타낸 것은 초기 미생물 농도 차이와 미생물 종류의 차이에 기인한 것으로 판단된다. *R. Solanacearum*는 고추 풋마름병을 유발하는 비포자형성, 그람음성 박테리아이고 *P. capsici*는 고추역병균으로 유주낭을 형성하는 균류로 알려져 있다.

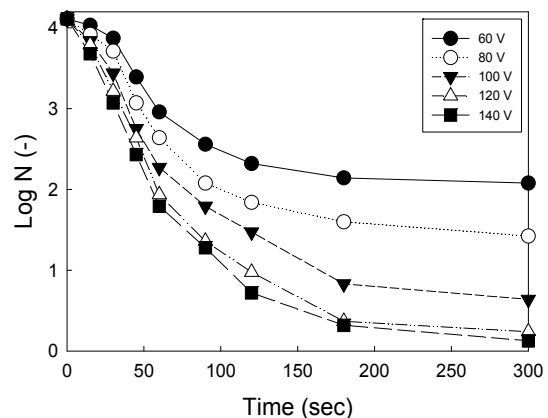


Fig. 2. Effect of 1st voltage on the inactivation of *P. capsici* (N, Number of microorganisms).

1차 전압이 80 V 이하에서는 30초 이내에서 불활성화 속도가 빠르지 않은 지체기가 발생하는 것을 볼 수 있었으나, 100 V 이상에서는 30초 이내에서도 지체기가 관찰되지 않았다.

소독제를 이용한 미생물의 소독에서 나타는 곡선 형태는 대략 4가지로 알려져 있다(Gyürék, 1998). (a) 지수적 감소 (미생물이 지수적으로 소멸하는 가장 간단한 곡선); (b) 지체기 + 지수적 감소 (미생물의 불활성화 kinetic에서 가장 일반적으로 나타나는 곡선으로 초기에 shoulder나 lag phase가 있는 불활성 곡선); (c) 지체기 + 꼬리달기 (tailing off, 미생물이 균집을 이루고 있거나 같은 종의 미생물이 미생물 별로 소독제에 대한 내

성이 다를 경우 나타남); (d) 꼬리달기 (tailing off, 최적의 성장 조건일 때와 비교하여 영양분이 부족한 상태에서 화학적 소독제에 대한 미생물의 내성률이 증가하기 때문에 일어나는 현상).

80 V 이하의 낮은 1차 전압에서 지체기가 뚜렷하게 나타나는 이유는 미생물의 세포벽 등 특정부분에서 소독제의 확산이 늦어지는 경우나 불활성화해야 하는 목표 미생물들이 다양하게 존재하고 있는 경우 등과 같이 여러 가지 요인들에 의해서 나타나는 것으로 알려져 있다(Jung, 2006). 본 실험에서는 원활한 공기 공급이 있기 때문에 미생물과 소독제의 불완전한 혼합이 발생한다고 보기 어렵고, 각종 라디칼, 오존, 과산화수소 등의 산화제가 발생하여 미생물과 활발하게 접촉하기 때문에 미생물의 세포벽에서 특정 부분에서 확산이 늦어지는 경우도 아니라고 판단되었다. 또한 목표 미생물이 하나이기 때문에 낮은 전압에서 소독 초기에 지체기가 나타난 것은 주로 미생물의 세포벽을 파괴하는데 시간이 많이 소요되었기 때문인 것으로 생각되었다. 이는 80 V 이하의 낮은 전압에서는 플라즈마 반응에서 생성되는 OH 라디칼과 각종 산화제의 농도가 낮기 때문에 반응 초기에 불활성화 시간이 많이 소요되는 지체기가 나타나는 것으로 판단되었다(Kim과 Park, 2011a).

120 V 이상의 높은 전압에서는 높은 에너지로 인하여 지체기 없이 미생물이 사멸되기 때문에 지수적 감소를 보이는 것으로 나타났다. 120 V 이상의 1차 전압에서는 불활성화 속도와 불활성화양에 있어 큰 차이를 나타내지 않았기 때문에 *P. capsici*의 불활성화를 위한 최적 전압은 100 V인 것으로 판단되었다.

수중 플라즈마를 이용한 *R. Solanacearum* 불활성화에 관한 선행연구(Baek 등, 2012b)에서는 최적의 1차 전압을 100 V인 것으로 판단함으로써, 미생물의 차이에 따른 최적 운전조건의 변화는 약간 있으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 불활성화 속도에 있어서는 미생물의 종류에 따라 큰 차이를 나타내었는데, *P. capsici*는 균류라는 특징으로 인하여 박테리아인 *R. Solanacearum*에 비해 훨씬 낮은 불활성화 속도와 불활성화 효율을 나타내었다.

3.2. 2차 전압의 영향

1차 전압에 이은 2차 전압의 변화에 따른 *P. capsici*

의 불활성화 영향을 관찰하기 위하여, 1차 전압 100 V, 공기 공급량 4 L/min인 조건에서 2차 전압을 4 kV, 7.5 kV, 15 kV로 변화시키면서 불활성화 실험을 실시하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

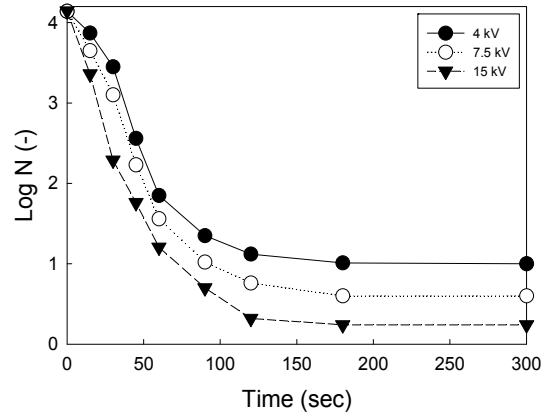


Fig. 3. Effect of 2nd voltage on the inactivation of *P. capsici* (N, Number of microorganisms).

2차 전압을 증가시키기에 따라 불활성화 속도와 불활성화량은 증가하는 것으로 나타났다. 60초 이내의 불활성화 속도를 비교해 볼 때, 4 kV에서는 2.29 log(CFU/mL)/min, 7.5 kV에서는 2.58 log(CFU/mL)/min, 15 kV에서는 2.95 log(CFU/mL)/min를 나타내어 불활성화 속도는 2차 전압을 증가시키기에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 초기 미생물량을 약 4 log(CFU/mL)로 비교적 일정하게 유지한 상태에서 불활성화 실험 후 2분이 경과된 시점에서의 불활성화량을 비교해 보면, 4 kV에서는 3.02 log(CFU/mL), 7.5 kV에서는 3.38 log(CFU/mL), 15 kV에서는 3.82 log(CFU/mL)을 나타냄으로써 2차전압의 증가에 따라 전체적인 불활성화량도 증가하는 것을 알 수 있었다.

이를 *R. Solanacearum* 불활성화에 관한 연구결과(Baek 등, 2012b)와 비교해보면, 다음과 같은 유사점과 차이점을 발견할 수 있다. 유사한 점은 2차 전압의 증가에 따라 불활성화 속도와 불활성화량은 증가한다는 것이다. 그러나 세부적인 면을 관찰해보면 상당한 차이를 발견할 수 있다. *R. Solanacearum*의 경우 7.5 kV 이하에서는 2 log(CFU/mL)의 최종 불활성화량을 나타내었으나, 15 kV에서는 6.1 log(CFU/mL)의 최종 불활성화

량을 나타냄으로써 어느 임계치를 벗어난 2차 전압에 있어서는 급격한 불활성화를 나타낸다는 것을 알 수 있었다. 이에 비해 *P. capsici*의 불활성화 경우에는 2차 전압의 증가함에 따라 급격한 불활성화 량의 변화를 나타내는 것이 아니라 약간의 점진적인 변화를 나타냄으로써 뚜렷한 임계치 2차 전압을 발견하기 어려웠다. 이는 유사한 실험조건에서 관찰된 결과이므로 불활성화 조건에 따른 변화라기보다는 미생물의 저항성에 따른 차이에 기인하는 것으로 판단되었으나, 구체적인 미생물의 저항성 차이는 차후 계속 연구해 볼 필요가 있는 것으로 생각된다.

3.3. pH의 영향

*P. capsici*의 불활성화에 미치는 pH의 영향을 관찰하기 위하여 1차 전압은 100 V, 2차 전압은 15 kV, 공기량은 4 L/min으로 일정하게 유지한 상태에서 초기 pH 조건을 3에서 11까지 변화시키면서 시간에 따른 *P. capsici* 개체수 변화를 관찰하였다(Fig. 4).

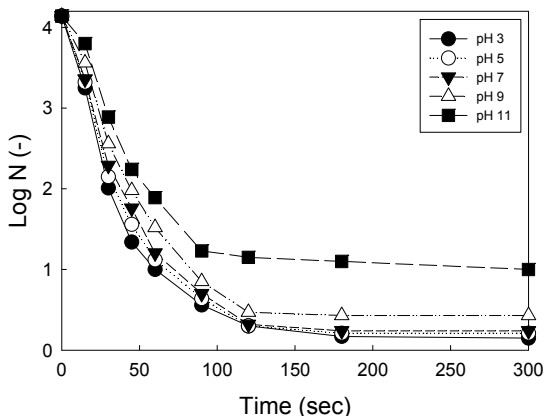


Fig. 4. Effect of pH on the inactivation of *P. capsici* (N, Number of microorganisms).

pH 3에서 초기 30초 내의 불활성화 속도는 4.27 log(CFU/mL)/min을 나타내었으나, 초기 pH가 5, 7, 9, 11으로 증가함에 따라 초기 불활성화 속도는 각각 3.98, 3.72, 3.16, 2.5 log(CFU/mL)/min으로 감소하였으며, 특히, pH 11에서는 다른 pH 조건에 비해 불활성화 속도가 상당한 정도로 감소하였다. 또한, 초기 pH의 조건에 따른 잔존 미생물량을 비교해 볼 때도 pH 3에서는 경과

시간 5분에서 0.15 log(CFU/mL)의 낮은 잔존 미생물량을 나타내었으나, 초기 pH가 5, 7, 9, 11으로 증가함에 따라 잔존 미생물량은 각각 0.21, 0.24, 0.43, 1.00 log(CFU/mL)으로 증가함으로써 불활성화율이 감소된다는 것을 알 수 있었다.

이는 pH가 산성영역에서는 오존이 안정하여 비교적 일정하게 유지되지만 pH가 염기성 영역에서는 오존의 분해가 이루어진다는 발표가 있었다(Chen 등, 2004). 그러므로 본 플라즈마 반응기에서는 미생물의 불활성화에 영향을 미치는 인자로 여러 가지가 있으나, 그중 가장 영향이 큰 인자는 오존으로 발표된 바 있으므로, 플라즈마 반응기에서 pH의 증가에 따른 *P. capsici*의 불활성화의 감소는 pH가 증가함에 따라 오존의 분해가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

전체적으로 볼 때 플라즈마를 이용한 *P. capsici*의 불활성화 pH가 낮을수록 유리하고 pH가 높을수록 불리한 것으로 나타났다. 이 경향은 *R. Solanacearum* 불활성화에 관한 연구결과(Baek 등, 2012b)와 유사하였다. *R. Solanacearum*의 불활성화의 경우에는 pH 3과 pH 11의 최종 잔존 미생물량의 차이는 0.3 log(CFU/mL)로 비교적 적었으나, *P. capsici*의 경우에는 유사한 실험조건에서 0.85 log(CFU/mL)로 나타남으로써 pH의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었다. 이는 각 미생물이 pH에 따라 소독제에 대한 저항성이 다르기 때문인 것으로 판단해 볼 수 있다(Kim 등, 2003).

3.4. 공기 주입량의 영향

플라즈마를 이용한 *P. capsici*의 불활성화 과정 중, 공기 주입량의 변화가 *P. capsici*의 불활성화에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 1차 전압과 2차 전압을 각각 100 V와 15 kV로 고정한 상태에서 공기 주입량을 1 L/min에서 5 L/min으로 변화시키면서 시간에 따른 *P. capsici*의 잔존 개체수를 측정하였다(Fig. 5). 여기서, 공기와 같은 가스의 주입은 유전체 장벽을 형성함으로써 플라즈마가 생성되는데 있어 절대적으로 중요한 인자이다. 또한, 유전체 내부로 유입되는 가스의 종류와 농도에 따라 생성되는 산화제의 종류와 농도가 달라짐으로써 소독효과에 미치는 영향도 큰 것으로 알려져 있다(Son과 Lee, 2011).

공기 주입량을 증가시키에 따라 *P. capsici*의 불활성

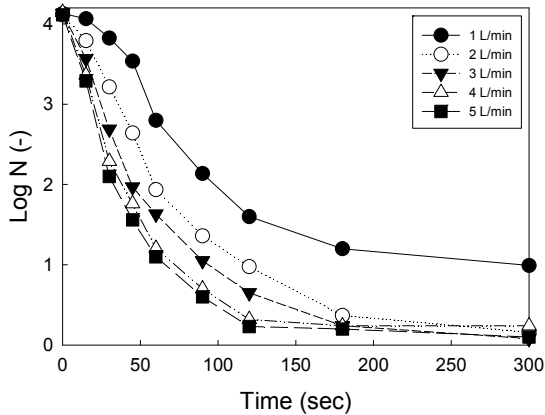


Fig. 5. Effect of air flow rate on the inactivation of *P. capsici* (N, Number of microorganisms).

화 속도는 증가하는 것으로 나타났다. 1 L/min에서는 1.33 log(CFU/mL)/min, 2 L/min에서는 2.18 log(CFU/mL)/min, 3 L/min에서는 2.50 log(CFU/mL)/min, 그리고 4 L/min과 5 L/min에서는 각각 2.94 log(CFU/mL)/min 와 3.01 log(CFU/mL)/min의 불활성화 속도를 나타내었다. 이 결과를 볼 때, 공기 주입량이 가장 적은 1 L/min에서는 가장 낮은 불활성화 속도를 나타내었고 공기 주입량을 증가시키기에 따라 불활성화 속도는 증가하다가 4 L/min과 5 L/min에서의 불활성화 속도는 비슷하게 나타남으로써, 본 실험에서는 4 L/min 이상의 공기 주입량은 불활성화 속도의 변화에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 판단되었다.

또한, 공기 주입량의 변화가 *P. capsici*의 잔존 개체수에 미치는 영향을 보면, 전체적으로는 공기 주입량이 증가하면 잔존하는 *P. capsici*의 개체수가 감소하는 것으로 나타났으나, 5분이 경과된 시점에서 *P. capsici*의 잔존 개체수로 비교해 보면 다음과 같이 나타났다. 초기 4 log(CFU/mL) 즉, 10^4 CFU/mL의 개체수에서, 1 L/min의 공기주입량에서는 0.99 log(CFU/mL)로서 실제 10 마리 정도의 개체수가 생존하였으나, 2 L/min 이상에서는 0.16, 0.08, 0.24, 0.10 log(CFU/mL)를 나타냄으로써 실제 1마리 내외의 생존 개체수를 나타내어 공기 주입량에 따른 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

그러므로 초기 *P. capsici*의 불활성화 속도와 잔존 개체수를 고려해 볼 때, 4 L/min의 공기 주입량을 유지하는 것이 가장 적절할 것으로 판단되었다.

*R. Solanacearum*의 불활성화의 경우(Baek 등, 2012b)와 비교해 보면, 1 L/min의 공기 주입량에서 *R. Solanacearum*의 경우에는 4 log(CFU/mL)의 불활성화를 나타내었고 본 연구의 *P. capsici*의 경우에는 3 log(CFU/mL)의 불활성화를 나타내어 유사한 불활성화 정도를 나타내었고 1 L/min의 공기 주입량에서는 완전한 불활성화를 기대하기 힘들어 잔존하는 미생물 개체수가 많았다. 그러나 공기 주입량을 2 L/min 이상으로 증가시키기에 따라 플라즈마 반응이 활발해지고 그에 따라 여러 종류의 산화제 발생량이 증가함에 따라 미생물들의 불활성화도 증가하였고 잔존하는 미생물 개체수도 급격하게 감소하였다.

3.5. 양액 농도의 영향

수경 재배시 양액을 소독할 경우에는 양액에 의해 소독효과가 영향을 받을 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 양액의 농도가 *P. capsici*의 불활성화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1차 전압과 2차 전압을 각각 100 V와 15 kV로 고정하고 공기 주입량을 4 L/min 으로 일정하게 유지한 상태에서, 증류수, 기본 양액, 3배 농도의 양액을 이용하여 실험하여 시간에 따른 *P. capsici*의 잔존 개체수를 측정하였다(Fig. 6).

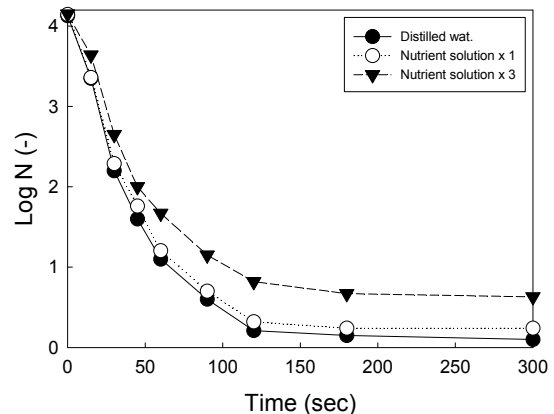


Fig. 6. Effect of incubation water concentration on the inactivation of *P. capsici* (N, Number of microorganisms).

증류수와 양액에서 *P. capsici*의 초기 불활성화 속도는 각각 3.03 log(CFU/mL)/min과 2.94 log(CFU/mL)/min으로 나타나, 양액에서의 불활성화 속도가 약간 낮았으

나 그 차이는 미미하였다. 그러나 3배 농도의 양액으로 변화시키기에 따라 불활성화 속도는 $2.48 \log(\text{CFU/mL})/\text{min}$ 으로 뚜렷하게 감소하였다. 이는 양액이 플라즈마 반응 중 생성된 산화제와 반응함으로써 상대적으로 미생물에 미치는 산화제의 영향을 감소시킬 수도 있고, 양액의 중의 일부 성분은 콜로이드 성분으로 존재함으로써 미생물에게 산화제에 대한 피난처를 제공한 것으로 생각해 볼 수도 있다(Kim 등, 2003).

미생물 잔존 개체수에 있어서도 증류수와 양액에서는 5분의 경과 시간에서 각각 $0.1 \log(\text{CFU/mL})$ 와 $0.24 \log(\text{CFU/mL})$ 로 잔존함으로써 거의 비슷하였으나, 양액 농도로 3배로 증가시키기에 따라 잔존 개체수는 $0.63 \log(\text{CFU/mL})$ 로 증가하는 것으로 나타났다.

그러므로 양액 농도가 매우 높은 경우에는 양액 농도가 미생물의 불활성화에 미치는 영향이 크나, 본 연구와 같은 양액 농도에서는 양액이 미생물의 불활성화에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 고추 역병균인 *Phytophthora capsici* (KACC 40483)을 불활성화시키기 위하여 플라즈마 반응을 사용한 연구로서, 플라즈마 반응기의 주요 운전 인자인 1차 전압, 2차 전압, 공기주입량, pH, 양액 농도의 변화가 *P. capsici*의 불활성화에 미치는 영향을 관찰함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 1차 전압이 80 V 이하에서는 30초 이내에서 불활성화 속도가 빠르지 않은 지체기가 발생하였으나, 100 V 이상에서는 지체기가 발생하지 않았다. 불활성화 속도에 있어서는 미생물의 종류에 따라 큰 차이를 나타내었다.

2) 2차 전압을 증가시키기에 따라 불활성화 속도와 불활성화량은 증가하였다.

3) pH 3에서 초기 불활성화 속도는 가장 높았으며, pH 11에서는 다른 pH 조건에 비해 불활성화 속도가 가장 많이 감소하였다. 초기 pH의 조건에 따른 잔존 미생물량을 비교해 볼 때 pH 3에서는 가장 낮은 잔존 미생물량을 나타내었으나, 초기 pH가 5, 7, 9, 11으로 증가함에 따라 잔존 미생물량은 증가함으로써 불활성화율이 감소하였다.

4) 공기 주입량을 증가시키기에 따라 *P. capsici*의 불활성화 속도는 증가하였으나, 4 L/min과 5 L/min에서는 유사한 정도의 불활성화 속도를 나타내었다. 전체적으로는 공기 주입량이 증가하면 잔존하는 *P. capsici*의 개체수가 감소하였으나, 2 L/min 이상에서는 1마리 내외의 생존 개체수를 나타내어 공기 주입량에 따른 차이가 거의 없었다. 초기 *P. capsici*의 불활성화 속도와 잔존 개체수를 고려해 볼 때, 4 L/min의 공기 주입량을 유지하는 것이 가장 적절할 것으로 판단되었다.

5) 증류수와 양액에서 *P. capsici*의 초기 불활성화 속도는 거의 비슷하였으나, 3배 농도의 양액으로 증가시키기에 따라 불활성화 속도는 뚜렷하게 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 대구가톨릭대학교 2013년 교내연구비의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 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, J. Environ. Sci., 21(7), 797-804.
- Chen, Y. S., Zhang, X. S., Dai, Y. C., Yuan, W. K., 2004, Pulsed high-voltage discharge plasma for degradation of phenol in aqueous solution, Sepa. and Puri. Tech., 34, 5-12.
- 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. of Biosystems Eng., 35(6), 420-425.
- Gyürék, L. L., Finch, G. R., 1998, Modeling water treatment chemical disinfection kinetics, J. Environ. Eng., 124(9), 783-793.

- 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. of Hazard. Mater.*, 41, 3-30.
- Jung, Y. J., 2006, Evaluation of the sequential and combined disinfection processes using ozone and UV: a study on the inactivation of indicator microorganism, Master degree, Yonsei University.
- 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.
- 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. for Soill. Cul., Proc.*, 523-531.
- Runia, W. T., 1994, Disinfection of recirculation water from closed cultivation systems with ozone, *AcTa Hort.*, 361, 388-396.
- Son, H. H., Lee, W. G., 2011, Treatment of Ar/O₂ atmospheric pressure plasma for sterilization, *Appl. Chem. Eng.*, 22(3), 261-265.
- Sugiarto, A. T., Ito, S., Ohshima, T., Sato, M., Skalny, J. D., 2003, Oxidative decolorization of dyes by pulsed discharge plasma in water, *J. Electrosta.*, 58, 135-145.