

수중 Plasma 공정을 이용한 *Ralstonia Solanacearum* 불활성화

백상은 · 김동석 · 박영식^{1)*}

대구가톨릭대학교 환경과학과, ¹⁾대구대학교 기초교육원
(2012년 1월 20일 접수; 2012년 6월 11일 수정; 2012년 7월 19일 채택)

Inactivation of *Ralstonia Solanacearum* Using Aquatic 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 712-830, Korea

(Manuscript received 20 January, 2012; revised 11 June, 2012; accepted 19 July, 2012)

Abstract

A dielectric barrier discharge (DBD) plasma reactor was investigated for the inactivation of *Ralstonia Solanacearum* which causes bacterial wilt in aquaculture. The DBD plasma reactor of this study was divided into power supply unit, gas supply unit and plasma reactor. The plasma reactor consisted of a quartz dielectric tube, discharge electrode (inner) and ground electrode (outer). The experimental results showed that the optimum 1st voltage, 2nd voltage, air flow rate and pH were for 100 V (1st voltage), 15 kV (2nd voltage), 4 L/min, and pH 3, respectively. At a low 1st voltage, shoulder and tailing off phenomena was observed. The shoulder phenomenon was decreased as the increase of 1st voltage. *R. Solanacearum* disinfection in the lower air flow rate was showed shoulder and tailing off phenomenon because the active species generated less. Under optimum condition, shoulder and tailing off phenomenon was reduced. When the 2nd voltage was less than 7.5 kV, tailing off phenomenon was observed and this was not vanishes even though the increase of the disinfection time. The inactivation efficiency increased as the increase of air flow rate, however, the efficiency decreased when the air flow rate was above 4 L/min. *R. Solanacearum* disinfection at pH 3 showed somewhat higher than in pH 11. The pH effect of *R. Solanacearum* deactivation is less than the impact on other factor.

Key Words : Dielectric barrier discharge plasma, Inactivation, *Ralstonia Solanacearum*, Optimum operation condition

1. 서론

최근 들어 농업을 비롯한 모든 산업에서 친환경적인 방법들이 연구 개발되고 있는데 수경재배에서도 사용하고 남은 폐양액을 최대한 회수하여 재활용할

수 있는 순환식 수경재배 기술 개발에 대한 관심이 날로 증가하고 있다(Nam, 2004). 폐기되는 폐양액을 재이용하기 위해서는 수경재배라는 특성상 양액 속에 병원균이 발생하면 토경재배에 비하여 뿌리와와의 접촉 기회가 많아 병원균의 확산이 빠르고 양액 탱크를 경유하여 재배조 전체에 확산되기 쉬운 문제를 해결해야 할 필요가 있다. 따라서 폐양액의 완전 살균에 의한 배지 또는 뿌리 주변에서 병원균이나 바이러스의 발병을 억제하는 일이 중요하다(Rural Development Administration, 2006).

*Corresponding author : Young-Seek Park, Faculty of Liberal Education, Daegu University, Gyeongbuk 712-830, Korea
Phone: +82-53-850-4571
E-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

순환식 양액재배에서는 자외선 살균법, 오존처리법, 모래여과법, 막여과법, 가열법 및 초음파 처리법 등의 물리적 방제법, 농약 등의 화학 약제를 이용하는 화학적 방제법, 길항성 미생물을 이용하는 생물학적 방제법 등이 소개되고 있다. 이중 물리, 화학적 방제법은 자외선 살균법, 오존 살균법, 및 열처리 법 재래식 소독법을 중심으로 양액 재배 현장에서 많이 이용되고 있는 실정이다(Cho 등, 2000).

최근 고급산화법(Advanced oxidation processes, AOPs)에 관심을 갖게 되면서 수처리 여러 분야에서 AOPs를 이용한 공정이 연구·개발되고 있다. 특히, AOPs는 재래식 수처리 공정으로 처리하기 힘든 난분해성 폐수처리는 물론 소독에도 효과적이라는 것이 여러 연구자로부터 보고되었다(Coast 등, 2008; Jung 등, 2010).

환경 분야에는 고급산화법이 빠르게 적용되고 있으나, 농업 분야인 수경재배를 위한 양액의 소독 시스템에는 최신 소독 공정의 적용이 상대적으로 늦어 재래식 처리 방식인 열처리, 모래여과, 자외선조사, 오존처리 등이 아직도 현장에서 이용되고 있다. 자외선 살균법은 환경친화적이며 과잉 조사에 의한 피해가 적고, 초기 투자비용과 작동 비용이 저렴하며, 다양한 처리 용량이 개발되었다는 것이다. 그러나 철과 망간의 흡착으로 UV 에너지 감소 및 자외선 조사 후 철과 망간 농도가 감소하고 양액의 깊이와 유속에 따라 살균 처리효과가 달라질 수 있다. 또한 램프의 수명과 표면의 오염이 배액의 살균력에 영향을 줄 수 있고 조사장치의 효율성이 문제가 될 수 있다(Acher 등, 1997).

오존살균법은 살균 반응 후 양액 내 용존산소량이 증가하며, pH와 EC(전기전도도) 변화량의 없을 뿐만 아니라 오존의 잔류시간이 짧은 등의 장점이 있다. 반면 단점으로는 오존 살균 후 킬레이트 철이 산화철로 변화하기 때문에 활성탄 등으로 제거해줄 필요성이 있으며, 살균 효과를 높이기 위하여 낮은 pH 조건을 위한 산 공급장치가 필요하다(Terzoe 등, 1995).

양액재배에서 발생하는 병 중 양액을 매개로 하여 발생하는 주요 병은 청고병, 역병 등이 있다. 이 중에서 *Ralstonia Solanacearum*는 작물체의 뿌리 및 줄기에 침투하여, 작물체의 지상부를 푸른 상태로 급격히 시들어 고사하게 하는 풋마름병을 일으키는 병원체이

다. 특히, 순환식 양액재배의 경우 병원균이 배양액과 함께 순환하여 시설전체를 오염시켜 시설내의 모든 토마토에 병원균이 급속히 전파 될 수 있다(Lee 등, 2005).

환경분야 중 수처리에 이용되는 저온 플라즈마 공정은 주로 수중에서 플라즈마를 발생시키면 H_2O_2 와 O_3 등과 같은 화학적 활성종, 라디칼 및 산화제 등이 생성되는데, 이들 화학종들의 산화력이 높은 것으로 알려져 있으며, 수중 플라즈마 발생시 활성 화학종의 UV-C 및 shock wave 등도 발생되어 산화·소독 반응에 관여하는 것으로 알려져 있다(Joshi 등, 1995; Sugiarto 등, 2003).

본 연구는 고급산화법의 한 종류인 유전체 장벽 방전 현상을 이용한 수중 플라즈마를 이용하여 양액중의 *R. Solanacearum*를 불활성화시켜 소독공정에 대한 수중 플라즈마의 적용 가능성을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 수중 플라즈마 형성의 주요 인자인 1차 전압, 공기 공급량, 2차 전압 및 pH의 변화가 *R. Solanacearum*의 불활성화에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 장치 및 운전 조건

실험에 사용한 반응기 시스템은 회분식으로 제작하였으며 Fig. 1에 개요도를 나타내었다. 본 실험에 사용한 플라즈마 시스템은 유전체 방전 플라즈마 반응기 시스템으로써 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. 유전체인 석영관의 내경과 두께는 각각 7 mm와 1 mm로 제작되었고, 접지 전극과 방전 전극은 각각 스프링 형태(직경, 1 mm)와 직선 형태(직경, 2 mm)의 티타늄 선을 사용하였다. 전극과 유전체의 재질 및 직경은 기초 실험을 통하여 조사하였고 이를 토대로 제작하였다.

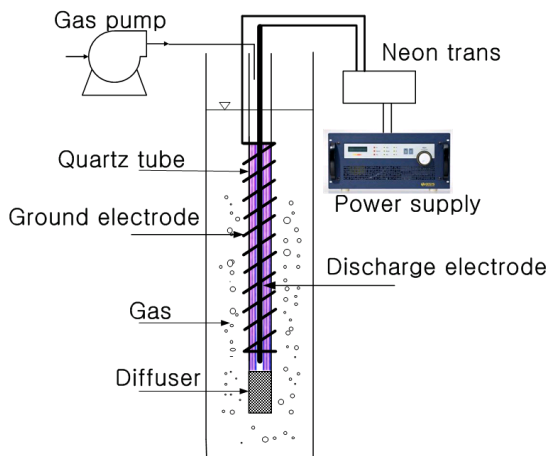


Fig. 1. Schematic diagram of dielectric barrier discharge (DBD) plasma process.

반응기에 주입되는 기체는 공기로서, 공기펌프를 사용하여 발생된 공기를 rotameter를 이용하여 유량을 조절한 뒤 석영관 내부로 공급하였다.

본 실험에 사용된 전원공급 장치는 크게 1차 전압 조절장치와 2차 전압조절장치로 구분 할 수 있다. 1차 전압조절장치는 반응기에 고전압을 발생시키는 네온 트랜스에 전원을 공급하기 위한 장치로서 슬라이다스를 이용하여 전압을 변화시키면서 운전하였다. 전극에 고전압을 공급하는 2차 전원의 전압은 주파수가 20 kHz인 네온트랜스를 이용하여 조절하였다.

1차 전압은 30 V ~ 160 V, 공기 공급량은 1 L/min ~ 5 L/min, 2차 전압은 4, 7.5, 15 kV, pH는 3, 7, 11로 각각 조절하여 실험을 실시하였다.

또한, 사용된 풋마름병균(*Ralstonia solanacearum*)은 한국미생물센터(KACC 10701)에서 분양받아 실험을 실시하였다. Nutrient broth(beef extract 3 g, peptone 5 g, glucose 2.5 g, distilled water 1 L)에 접종하여 30 °C에서 150 rpm으로 36시간 배양한 다음 원심분리(4,000 rpm, 20 min)후 균 stock을 확보하였다.

2.2. 실험 방법

양액 성분 중 대량 원소는 일본 야채시험장 표준액을 기준으로 제조하여 사용했으며, Table 1에 성분 나타내었다(Yu 등, 2006).

Table 1. Compounds of Nutrient

Compounds	mg/L
H ₃ BO ₃	2,860
MnCl ₂ · 4H ₂ O	1,810
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	220
CuSO ₄ · 5H ₂ O	80
Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	25
KNO ₃	480
NH ₄ H ₂ PO ₄	59.54
(Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	158
MgSO ₄ · 7H ₂ O	48.5

균 stock 용액 1 mL를 양액 1 L에 주입하여 초기 미생물 농도를 6.4 x 10¹⁰ CFU/L로 설정한 다음, 1 L용량의 반응기에 소독 실험을 수행하였다. 적정시간 간격으로 시료를 채취하여 무균실에서 적절한 희석을 실시한 다음, 30 °C로 유지되는 BOD 배양기에서 48 시간동안 배양한 후 집락을 측정하여 균수를 계수하였다. 주입평판법에 의해 1개의 시료 당 3개의 평판을 제조하였으며 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.

3. 결과 및 고찰

3.1. 1차 전압이 *R. Solanacearum* 불활성화에 미치는 영향

1차 전압의 변화에 따른 *R. Solanacearum*의 불활성화를 관찰하기 위하여, 2차 전압 15 kV, 공기 공급량 4 L/min인 조건에서 1차 전압을 30 ~ 160 V로 바꾸어가며 소독 실험을 실시하여 Fig. 2에 나타내었다. 1차 전압이 80 V 이하에서는 15 ~ 45초 사이에 불활성화가 속도가 완만해지는 지체기가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 80 V 이하의 낮은 전압에서는 지체기가 뚜렷하게 나타나는 경향을 보였으나, 100 V와 120 V에서는 지체기의 흔적을 보였으며, 160 V에서는 지체기가 관찰되지 않았다. 그러므로 낮은 전압에서는 지체기가 발생하나 높은 전압에서는 지체기가 발생하지

않는 것으로 판단된다. 또한 30 V에서는 불활성화속도가 느려지는 꼬리달기 현상(tailing off)이 나타났다.

소독제를 이용한 미생물의 소독에서 나타는 곡선 형태는 대략 4가지이다. (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 내성이 다를 경우 나타남); (d) tailing off (최적의 성장 조건일 때와 비교하여 영양분이 부족한 상태에서 화학적 소독제에 대한 미생물의 내성률이 증가하기 때문에 일어나는 현상)(Gyürék, 1998).

80 V 이하의 낮은 전압에서 관찰된 지체기 후 지수적 감소 현상은 소독제를 이용한 소독 실험에서 미생물과 소독제의 불완전한 혼합이나 미생물의 세포벽이 파괴되는데 소독제가 많이 소요되는 경우, 미생물의 세포벽 등 특정부분에서 소독제의 확산이 늦어지는 경우, 불활성화해야 하는 target 미생물이 다양하게 존재하는 있는 경우 등 4 가지 요인에 의해서 나타나는 것으로 알려져 있다(Jung, 2006). 본 실험에 나타난 결과로 볼 때 1 L의 반응기에 4 ~ 5 L/min의 공기를 주입하기 때문에 미생물과 소독제의 불완전한 혼합이 발생한다고 보기 어렵다. *R. Solanacearum*은 구형이며, 플라즈마에서는 각종 라디칼, 오존, 과산화수소 등의 산화제가 발생하여 미생물과 접촉하기 때문에 미생물의 세포벽에서 특정부분에서 확산이 늦어지는 경우도 아니라고 판단되었다. 또한 target 미생물이 하나이기 때문에 낮은 전압에서 소독 초기에 지체기가 나타난 것은 주로 미생물의 세포벽을 파괴하는데 시간이 소요되기 때문인 것으로 사료되었다. 이는 80 V 이하의 낮은 전압에서는 플라즈마 반응에서 생성되는 OH 라디칼과 각종 산화제의 농도가 낮기 때문에 반응 초기에 소독에 시간이 소요되는 지체기가 나타나는 것으로 사료되었다(Kim과 Park, 2011a).

100 V 이상의 높은 전압에서는 높은 에너지로 지체기 없이 미생물이 사멸되기 때문에 지수적 감소를 보이는 것으로 나타났다. 100 V 이상의 1차 전압에서는 초기 반응속도만 증가하는 경향을 보이기 때문에

R. Solanacearum 사멸을 위한 최적 전압은 100 V로 사료되었다.

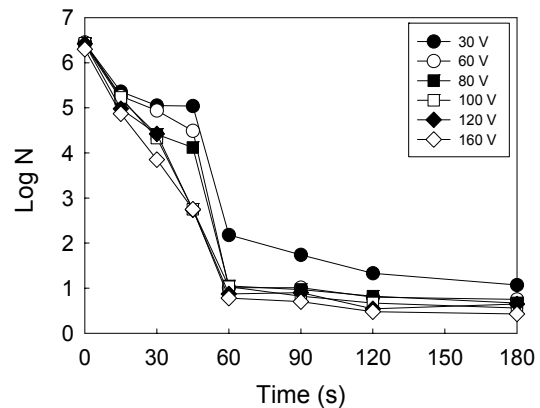


Fig. 2. Effect of 1st voltage on the inactivation of *R. Solanacearum* (N: Number of microorganism).

3.2. 공기 주입량이 *R. Solanacearum* 불활성화에 미치는 영향

공기량 변화에 따른 *R. Solanacearum*의 불활성화를 관찰하기 위하여 1차 전압과 2차 전압을 각각 100 V와 15 kV로 일정하게 유지한 상태에서 공기 주입량을 1 ~ 5 L/min로 변화시키면서 불활성화 실험을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

공기량이 1 L/min으로 낮게 유지하였을 때는 100 V와 15 kV의 높은 1차 전압과 2차 전압의 조건에도 불구하고 소독효과가 높지 않게 나타났다. 수중 방전 플라즈마에서는 유전체에 전극을 삽입하여 플라즈마를 발생시키는 형태이므로, 주입되는 가스가 없으면 방전 전극 내부로 물이 유입되게 되어 플라즈마의 형성이 이루어 질수 없으므로 가스의 주입은 매우 중요한 인자이다. 유전체 내부로 공급되는 가스의 종류와 농도에 따라 발생하는 산화제의 종류와 농도도 달라진다(Son과 Lee, 2011). 특히 방전 전극 내부로 유입되는 산소나 공기 중의 산소가 플라즈마와 반응하여 O_3 , $\cdot OH$, H_2O_2 등의 활성 화학종으로 해리·결합하기 때문에 공기 주입량은 미생물의 불활성화에 매우 중요하게 작용하게 된다(Mok과 Song, 2010).

1 L/min의 적은 공기량에서는 유전체 내부의 단락 현상을 방지할 수는 있지만 불활성화를 유발시킬 수 있는 활성 화학종이 상대적으로 적게 발생됨으로써 *R.*

*Solanacearum*의 불활성화가 원활하게 진행되지 않아 지체기와 꼬리달기 현상이 나타났다고 사료되었다. 2 L/min으로 주입 공기량을 증가시키에 따라 제거되는 *R. Solanacearum*수가 4 log에서 6 log로 증가하였지만 1 L/min과 같이 지체기와 꼬리달기 현상도 나타났다. 이는 적은 공기로 인해 산소에서 생성되는 산화제의 양이 적기 때문인 것으로 사료되었다. Kim과 Park(2011b)은 본 연구에 사용한 반응기와 같은 반응기에서 OH 생성의 간접지표인 RNO (N, N-Dimethyl-4-nitrosoaniline) 분해에서 공기가 1 L/min에서 RNO 분해율은 적지만 공기 주입량이 증가하면서 RNO 분해율이 증가한다고 보고한 결과와 비교할 때 공기 주입량에 따라 산화제 발생 농도가 차이되며 산화제 농도에 따라 *R. Solanacearum* 사멸도 같은 경향을 보여 지체기가 나타난다고 사료되었다. 2 ~ 4 L/min에서는 주입 공기량이 증가할수록 불활성화 속도는 서서히 증가하였다. 그러나 5 L/min에서는 4 L/min에서의 불활성화보다 감소하여 3 L/min의 경우와 유사하게 나타났다. Kim과 Park(2011)은 일정 공기 주입량까지 공기 주입량이 증가할수록 산화제 생성량이 증가하지만, 일정량 이상에서는 산기관을 통해 공급되는 과량의 공기에 의해 오존 등의 산화제의 체류시간이 짧아지기 때문에 반응에 참여하는 산화제가 줄어드는 역효과를 나타내어 염료인 Rhodamine B 제거에 대한 최적 공기 공급량이 존재한다고 보고하였다. 처리대상물질이 염료와 미생물로 다르지만, 같은 원리의 플

라즈마를 이용한 처리이기 때문에 주입 공기량이 증가함에 따라 활성 화학종의 생성은 증가하나 5 L/min에서는 활성 화학종들이 수중에 잔존하여 수중에 용해될 수 있는 시간이 상대적으로 감소하였기 때문인 것으로 판단되었다. 그러므로 불활성화를 위한 최적 주입 공기량은 4 L/min으로 사료되었다.

3.3. 2차 전압이 *R. Solanacearum* 불활성화에 미치는 영향

2차 전압 변화가 *R. Solanacearum*의 불활성화에 미치는 영향을 관찰하여 Fig. 4에 나타내었다. 2차 전압 외에 1차 전압과 공기 공급량은 각각 100 V와 4 L/min으로 일정하게 유지한 상태에서 2차 전압을 4, 7.5, 15 kV로 변화시키면서 실험하였다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 4 kV와 7.5 kV의 2차 전압에서 초기 45초 이내에서는 각각 2.6 log와 2 log 정도의 불활성화를 나타내었고, 그 후 불활성화는 꼬리달기 현상을 나타내었다. 또한, 4 kV와 7.5 kV에서는 꼬리달기 현상이 45초 부근에 발생하고, 잔류 *R. Solanacearum*수가 각각 5 log와 4 log 이상이 되는 것으로 나타났다. 15 kV의 2차 전압에서는 60초 정도에서 꼬리달기 현상이 발생함으로써, 2차 전압이 증가할수록 꼬리달기 현상이 발생하는 시간이 늦어짐으로써 불활성화가 원활하게 발생된다는 것을 알 수 있었다. 15 kV의 2차 전압에서는 꼬리달기 현상이 발생하지만 180초 동안에 6 log 이상의 불활성화가 발생하여 대부분의 *R. Solanacearum*이 사멸되는 것으로 나타났다.

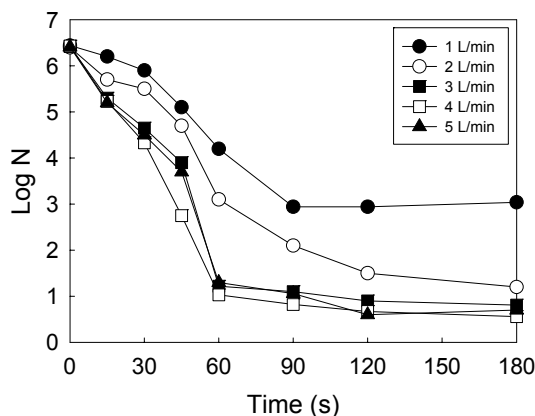


Fig. 3. Effect of air flow rate on the inactivation of *R. Solanacearum* (N: Number of microorganism).

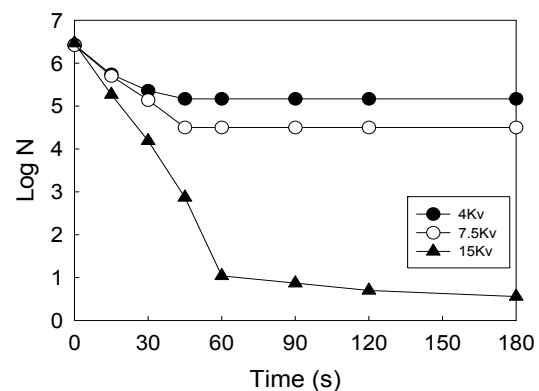


Fig. 4. Effect of 2nd voltage on the inactivation of *R. Solanacearum* (N: Number of microorganism).

그러므로 플라즈마를 이용하여 *R. Solanacearum* 를 불활성화하고자 할 경우, 플라즈마 에너지가 높은 상태인 15 kV 이상의 2차 전압에서 불활성화를 실시해야 한다는 것을 알 수 있었다.

3.4. pH가 *R. Solanacearum* 불활성화에 미치는 영향

pH가 *R. Solanacearum* 불활성화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 1차 전압 100 V, 2차 전압 15 kV, 공기 주입량 4 L/min인 실험조건 하에서, pH를 3, 7, 11로 변화시키면서 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. pH가 7과 11인 조건에서는 시간에 따른 *R. Solanacearum* 의 활성화에 큰 차이가 없었으나, pH가 3인 산성인 조건으로 유지하였을 경우에는 60초의 시간 경과에 따라 생존 미생물 수가 초기 7 log에서 1 log로 감소함에 따라 pH 7과 11인 조건에 비해 불활성화가 1 log 정도 증가한 것을 알 수 있었다.

Hoigen 등(1983)과 Chen 등(2004)은 산성 영역에서는 생성되는 오존은 안정하여 오존 농도가 일정하게 유지되지만 pH가 염기성 때 오존이 자가 분해되어 $\cdot\text{OH}$ 이 생성되어 염기성에서 페놀 등이 잘 분해 된다고 보고하였다. 그러므로 pH가 산성인 조건에서는 플라즈마 반응에 의해 형성된 O_3 과 $\cdot\text{OH}$ 이 불활성화의 주요 인자가 되고 pH가 염기성인 경우에는 산화력이 오존보다 더 높은 $\cdot\text{OH}$ 가 불활성화의 주요 인자가 되어 염기성에서의 *R. Solanacearum* 불활성화가 산성에서보다 높은 것으로 예상할 수 있어 본 연구결과와는 반대로 나타났다.

Kim과 Park(2011b)은 본 실험 시스템과 같은 유전체 방전 플라즈마 공정에서 $\cdot\text{OH}$ 생성의 간접지표인 RNO 분해에서 분해 되는 RNO 농도가 5분 동안 최적 조건에서 대략 30 ~ 40 mg/L이라고 보고하였고, Park과 Kim(2011a)은 발생하는 공급 가스로 공기를 이용하였을 때 오존과 과산화수소 농도는 20분에서 오존이 0.17 mg/L, 과산화수소가 0.35 mg/L이 생성된다고 보고하였다. Lukes 등(2004)이나 Chen 등(2004) 다른 연구자들의 반응기 형태(기-액 하이브리드, needle-plate형 반응기)와 전원의 형태(AC와 DC 차이, 펄스 전원) 등이 본 연구시스템과 달라 생성되는 오존 농도가 수십에서 수백 mg/L에 달하기 때문에 본 반응기 시스템에서의 낮은 오존 생성 농도와는 큰 차이를 보

여 Chen 등(2004)의 결과와 같은 결과를 얻을 수 있다고 사료되었다.

용액의 pH가 RNO 분해에 미치는 영향을 알아보기 위하여 초기 RNO 농도가 50 mg/L이고 플라즈마 발생 조건이 1차 전압, 160 V; 2차 전압, 15 kV; 공기 주입량, 4 L/min인 조건에서 RNO 분해는 pH 3이 pH 11보다 오차범위에서 높은 것으로 나타났다(data not shown). pH에 따라 RNO 분해가 차이를 보이지 않아 $\cdot\text{OH}$ 생성에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났고, 오존이 자가 분해하여 $\cdot\text{OH}$ 생성에 기여하는 것도 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서의 오존과 과산화수소 생성농도, RNO 분해 결과와 타 연구자들의 연구결과를 종합해 볼 때 본 연구에서 사용한 AC 전원과 고전압 발생장치로 네온트랜스를 이용하고 스프링형 접지 전극, 유전체인 석영과 방전 전극인 티타늄 봉으로 구성된 유전체 장벽 플라즈마 반응기를 사용한 본 플라즈마 시스템에서 발생하는 오존 농도는 타 연구자들과는 다르게 매우 낮으며, 생성되는 $\cdot\text{OH}$ 농도는 알 수 없지만 활성 산화종에서 $\cdot\text{OH}$ 의 비중이 mg/L이하의 농도가 생성되는 오존과 과산화수소보다 훨씬 더 크다고 사료되었다.

소독 공정에 영향을 주는 인자들이 여러 가지 존재하지만 가장 중요한 인자 중의 하나가 소독제의 농도와 접촉시간이다(Jung, 2006). 또한 잔류시간이 매우 짧은 $\cdot\text{OH}$ 보다 긴 잔류시간을 갖는 O_3 의 소독 효과가 더 좋다고 보고한 서(2010)의 연구결과가 본 연구

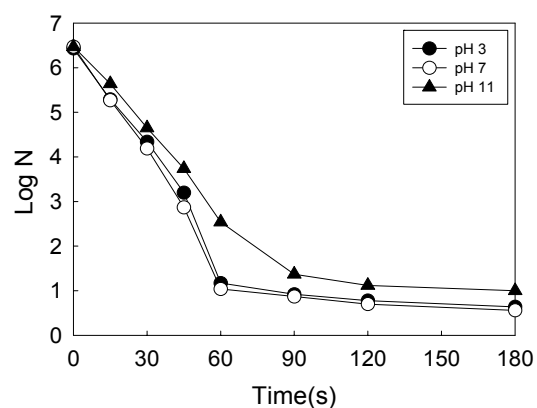


Fig. 5. Effect of pH on the on the inactivation of *R. Solanacearum* (N: Number of microorganism).

결과에서 관찰된 ·OH과 오존이 공존하는 pH 3에서의 소독이 pH 11에서보다 높다는 사실과 일치한다고 사료되었다. 그러나 pH가 *R. Solanacearum* 불활성화에 미치는 영향은 다른 인자보다는 낮은 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 수중에서 플라즈마를 발생시키는 유전체 방전 플라즈마 반응기를 이용하여 감자, 가지 및 토마토 등의 풋마름병을 일으키는 *R. Solanacearum*의 소독을 위해 여러가지 운전인자가 *R. Solanacearum* 불활성화에 미치는 영향을 고찰한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 80 V 이하의 1차 전압에서는 불활성화 속도가 느려지는 지체기가 뚜렷하게 나타났고, 100 V와 120 V에서는 지체기의 흔적을 보였으며, 160 V에서는 지체기가 관찰되지 않았다. 30 V에서는 불활성화 속도가 느려지는 꼬리달기 현상(tailing off)이 나타났다. 80 V 이하의 낮은 전압에서는 플라즈마 반응에서 생성되는 OH 라디칼과 각종 산화제의 농도가 낮기 때문에 지체기가 나타나는 것으로 사료되었다. *R. Solanacearum* 사멸을 위한 최적 적절한 전압은 100 V로 사료되었다.
2. 공기 공급량이 1 ~ 2 L/min에서는 활성 화학종이 상대적으로 적게 발생됨으로써 *R. Solanacearum*의 불활성화가 원활하게 진행되지 않아 지체기와 꼬리달기 현상이 나타난 것으로 사료되었다. *R. Solanacearum* 불활성화를 위한 최적 주입 공기량은 4 L/min으로 사료되었다. 5 L/min의 공기 공급량에서는 빠른 공기 속도로 산화제의 체류시간이 짧아져 반응에 참여하는 산화제가 줄어들어 최적 공기 공급량이 존재하는 것으로 사료되었다.
3. 4 kV와 7.5 kV의 낮은 2차 전압에서는 tailing off 현상이 45초에 발생한 후 소독시간이 증가하여도 불활성화가 진행되지 않았다. 15 kV에서도 꼬리달기 현상이 발생하지만 180초 동안에 6 log 이상의 불활성화가 발생하여 대부분의 *R. Solanacearum*이 사멸되는 것으로 나타났다.
4. pH 3에서의 *R. Solanacearum* 소독이 pH 11에서

보다 다소 높은 것으로 나타났지만 pH가 *R. Solanacearum* 불활성화에 미치는 영향은 다른 인자보다는 적은 것으로 나타났다.

감사의 글

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

참고 문헌

- Kim, D. S., Park, Y. S., 2011a, 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., 2011b, A basic study of plasma reactor of dielectric barrier discharge for the water treatment, *J. Environ. Sci.*, 20(5), 623-630.
- Son, H. H., Lee, W. G., 2011, Treatment of Ar/O₂ atmospheric pressure plasma for sterilization, *Appl. Chem. Eng.*, 22(3), 261-265.
- Yu, S. O., Choi, K. Y., Jeon K. S., Bae, J. H., 2006, Development of optimal nutrient solution of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. 'KoKo') in a closed soilless culture system, *J. Bio. Environ.*, 15(1), 54-60.
- 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.
- Jung, J. W., Park, J. W., Lee, C. S., 2010, Effects of operating parameters on dissolved ozone and phenol degradation in ozone contact reactor, *J. Environ. Eng.*, 32(3), 241-247.
- Acher, A., Heuer, B., Rubinskaya, E., Fischer, E. E., 1997, Use of ultraviolet-disinfected nutrient solutions in green houses, *J. Hort. sci.*, 72, 117-123.
- Ahn, J. W., Ku, J. H., 1998, Influence of N-P-K nutrient levels on ozone susceptibility of tomato plant, *Kor. J. Environ. Agri.*, 17(4), 352-357.
- 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., Seok, S. B., Chung, S. J., 2000, Present status and prospect of sterilization of nutrient solution for recycled hydroponics, *Kor. J. Hort. Sci. & Technol.*, 18(6), 890-899.
- Coast, Cr., Botta, C. M. R., Espindola, E. L. G., Oliva, P., 2008, Electrochemical treatment of tannery wastewater using DSA electrodes, *J. Hazard. Mater.*, 153, 616-627.
- Gyürék, L. L., Finch, G. R., 1998, Modeling water treatment chemical disinfection kinetics, *J. Environ. Eng.*, 124(9), 783-793.
- Hoigen, J., Bader H., 1983, Rate constants of reaction of ozone with organic an inorganic compounds in water, *Wat. Res.*, 10, 185-194.
- 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.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2011, Removal of Rhodamine B Dye Using a Water Plasma Process, *J. Environ. Sci.* 37(3), 218-225.
- 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.
- Lukes, P., Appleton, A. T., Locke, B. R., 2004, Hydrogen peroxide and ozone formation in hybrid gas-liquid electrical discharge reactors, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 40(1), 60-67.
- Mok, C. Y., Song, D. M., 2010, Low-pressure plasma inactivation of *Escherichia coli*, *Food Ecn. Pro.*, 14(3), 202-207.
- Nam, Y. I., 2004, Present status and future prospects for development of closed hydroponics in Korea, *Kor. Res. Soc. Protected Hort.*, 17(1), 1-7.
- Rural Development Administration, 2006, Closed hydroponic system and techniques suitable for korean protected cultivation environments, 32.
- Seo, M. J., 2010, Disinfection effects of ozone and secondary disinfectants on *Bacillus subtilis* spore, University of Seoul, Master degree.
- 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.
- Terazoe, H., Yoshihara, T., Nakaya, K., 1995, Development of hydroponic system using agriculture waste(2)-utilization of ozone for sterilization of nutrient solution, *Abiko Res. Lab. Rep. No. U98007*, 1-12.