

ORIGINAL ARTICLE

양액재배 시스템에서 유전체장벽방전 플라즈마를 이용한 시들음병균(*Fusarium oxysporum f. sp. radicans lycopersici*)의 불활성화

박영식*

대구대학교 창조융합학부

Inactivation of Wilt Germs (*Fusarium oxysporum f. sp. radicans lycopersici*) using Dielectric Barrier Discharge Plasma in Hydroponic Cultivation System

Young-Seek Park*

Division of Creative Integrater Studies, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

Abstract

This study was conducted to investigate the possibility of inactivating wilt germs (*Fusarium oxysporum f. sp. radicans lycopersici*) using Dielectric Barrier Discharge (DBD) plasma in a hydroponic system. Recirculating hydroponic cultivation system for inactivation consisted of planting port, LED lamp, water tank, and circulating pump for hydroponic and DBD plasma reactor. Two experiments were conducted: batch and intermittent continuous process. The effect of plasma treatment on Total Residual Oxidants (TRO) concentration change, *Fusarium* inactivation and growth of lettuce were investigated. In the batch experiment, most of the *Fusarium* was inactivated at a TRO concentration of 0.15 mg/L or more at four-day intervals. There was no change in lettuce growth after two times of plasma treatment for one week. The intermittent continuous experiment consisted of 30-minute, 60-minute, and 90-minute plasma treatment in 2 day intervals and 30-minute treatment a one-day; most of the *Fusarium* was inactivated only by treatment for 30-minute every two days. However, if inactivation under 10^1 CFU/mL is required, it will be necessary to treat for 60 minutes in 2 day intervals. The plasma treatment caused no damage to the lettuce, except the 30 min plasma treatment at the one-day interval. It was considered that the residual TRO concentration was higher than that of the other treatments.

Key words : Dielectric barrier discharge plasma, Hydroponic cultivation system, Total residual oxidants, Wilt germs, *Fusarium oxysporum f. sp. radicans lycopersici*

1. 서론

각종 기존 농업인 토경(土耕)재배의 경우 기후 변화

등으로 농업생산성이 감소되어 안정적인 농작물 생산의 필요성이 요구되고 있다. 식물 공장은 양액재배 시스템에 LED광을 결합하여 기후와 지역에 관계없이 농작물을

Received 15 February, 2019; Revised 2 April, 2019;

Accepted 25 April, 2019

*Corresponding author: Young-Seek Park, Division of Creative Integrater Studies, 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.

재배할 수 있는 장점이 있으며, 최근 IT-BT기술의 융복합화로 신성장 동력으로 성장할만한 충분한 잠재력을 가지고 있으나 초기 시설비가 많이 소요되는 등 경제성 확보가 가장 중요한 문제점 중의 하나이다(Jung and Lee, 2016). 식물공장의 핵심 기술 중의 하나인 양액재배 시스템은 양액을 점적(dripping)으로 작물에 투입한 후 흘러버리는 비순환식 양액재배와 폐양액을 재순환하여 사용하는 순환식 양액재배로 나눌 수 있다(Kim, 1998). 비순환식 양액재배의 경우 pH나 전기전도도 조절이 양액 제조시만 필요하기 때문에 장치가 간단하고, 양액을 버리기 때문에 지하부의 병원균이 전파되지 않는 장점이 있다(Blog of rural love gardening love, 2008). 그러나 비순환식 양액재배 시스템은 비료성분이 작물에 완전히 흡수되지 않은 조건에서 버려지기 때문에 비료 성분의 손실이 있으며, 양액 중에 함유된 BOD 성분은 물론 고농도의 질소, 인 성분이 방출되기 때문에 토양과 지하수가 오염되고 있는 실정이다. Cheon et al.(2009)은 오이, 파프리카 및 딸기 폐양액 종류에 따른 폐양액 원수 중 T-N 함량이 각각 94~113, 113~132 및 98~115 mg/L 범위였고, T-P 함량은 각각 12.5~16.3, 17.2~20.5 및 13.4~18.1 mg/L 범위라고 보고하였다.

순환식으로 양액재배할 경우 부족한 영양물질을 첨가하여 양액을 지속적으로 사용하는데, Lee and Roh(1998)는 오이를 양액으로 재배할 때 연간 수분 소비량과 양분 배출량이 순환식이 비순환식보다 20% 정도 줄어들었다고 보고하였다. 따라서 비순환식 양액재배를 순환식 양액재배로 전환할 경우 물과 양액 성분의 절감이라는 경제적 측면뿐만 아니라 환경적인 측면에서도 이점이 있기 때문에 순환식 양액재배로 전환할 필요성이 대두되고 있다(Kim and Park, 2015). 그러나 순환식 양액재배의 경우 토양재배에 비하여 미생물의 조성이 단순하고 근권 완충능력이 낮기 때문에 물을 좋아하는 병이 발생할 경우 급속하게 감염되는 불리한 조건을 가지고 있으며, 병이 침입한 경우에도 방제 방법이 별로 없는 실정이다(Hong et al., 2004). 순환식 양액재배에서 병해를 방제하기 위해 저항성 품종과 길항균을 이용하는 생물학적 방제법을 이용하거나, 배양액과 환경을 조절하는 재배생리학적 방법을 이용하는 방법, 배지소독, 윤작, 항생물질 등을 이용하고 있다(Nam et al., 2009).

최근에는 자외선 살균법, 오존살균법 및 열처리 등을

이용한 양액 살균기술이 현장에서 많이 이용되고 있다. 자외선 살균은 환경친화적이지만 철과 망간의 흡착 등으로 UV 에너지 감소 및 자외선 주사시 철과 망간의 산화로 인하여 이들 성분을 보충해 주어야하는 단점이 있다. 오존살균법은 오존의 강한 산화력을 이용하여 살균시키는 방법으로 살균 후 양액 내 용존산소량이 증가하고 pH와 전기전도도의 변화가 없는 장점이 있지만 살균 후 킬레이트 철이 산화철로 변하기 때문에 활성탄 등으로 제거해줄 필요가 있고, 오존처리 후 철, 망간, 아연 등의 성분량을 보충해줄 필요가 있다. 열처리법의 경우 95℃에서 30초간 살균하면 바이러스를 비롯한 모든 병원성미생물이 사멸되지만, 처리비용이 높은 단점이 있다(Cho et al., 2000)

본 연구자는 새로운 난분해성 물질 처리와 소독에 사용될 수 있는 수중 유전체 방전 플라즈마 공정에 대한 기초 연구를 수행한 결과 산화제 발생량이 많고 난분해성 물질 처리가 우수하여(Beak et al., 2011), 양액재배에서 시들음병을 일으키는 사상성 곰팡이인 *Fusarium oxysporum f. sp. radices lycopersici*의 불활성화에 적용가능하지 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

실험은 회분식과 연속식 불활성화로 나누어 실험하였으며, 회분식 불활성화 실험은 1 L 비커에서 실시하였다. 연속 실험에 사용한 양액재배 시스템을 Fig. 1에 나타내었다. 양액재배 시스템은 2 set가 설치되었고, 각 set는 가로와 세로가 각각 1 m, 높이가 2 m로, 양액재배 포트가 상, 하 2단이 설치되어 있다. 각 양액재배 포트는 6개의 포트가 이루어져 있으며, 각 단은 5 포기의 상추를 재배할 수 있다. 양액은 양액 순환용 수조의 펌프를 통하여 6개의 포트에 펌핑되어 흐른 후 중력에 의해 양액 순환용 수조로 유입된다. 각 단마다 200개의 LED 램프가 설치되어 있다. 양액 순환용 수조의 부피는 100 L이며, 70 L의 양액을 채워 30 W의 수중펌프로 양액재배 포트에 양액을 공급하여 순환시켰다. 1단은 상추만 재배하여 대조군으로 사용하였다. 2단은 상추 재배단에 *Fusarium*를 접종하여 미생물 오염을 고찰하고자 하였다. 다른 2단은 *Fusarium*를 접종한 후 플라즈마 공정에 의해 소독을

실시하였다.

플라즈마 시스템은 방전 전극(내부 전극), 유전체인 석영관, 접지 전극(외부 전극) 및 산기관으로 이루어진 플라즈마 반응기, 슬라이드와 네온트랜스로 이루어진 전원 공급장치 및 공기 펌프와 유량조절장치로 이루어진 공기 공급장치로 이루어져 있다. 플라즈마 반응기의 부피는 0.94 L이다. 유전체는 두께가 1 mm, 내경이 7 mm 인 석영관을 사용하였다. 방전 전극은 직경이 2 mm인 봉 형 전극, 접지 전극은 직경이 1 mm인 전극을 스프링 형태로 만든 후 사용하였으며 두 전극의 재질은 모두 티타늄이다.

불활성화 실험에 사용한 작물은 상추(적오크)이었으며, 파종하여 모종을 키운 후 양액재배 포트에 이식하였다. 실험에 사용한 균주는 시들음 병균으로 농업미생물 은행에서 분양받은 사상성 곰팡이인 *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis lycopersici* (KACC 40031)으로 직경 5 mm의 균사조각을 떼어 내어 PD broth (potato extract 4 g, dextrose 20 g)에 접종하고 25°C에서 150 rpm으로 4일 동안 진탕 배양하였다. 배양한 액체 배지는 4겹의 멸균 거즈로 여과하여 균사조각을 제거하고 분생포자의 현탁액을 준비하였다. 시험 농도는 10⁶ CFU/mL로 실험하였다.

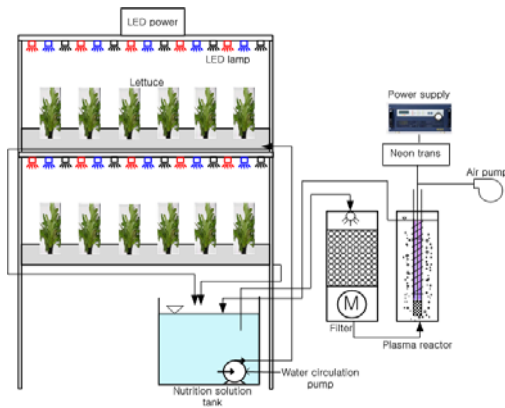


Fig. 1. Schematic diagram of nutrient culture system, plasma system.

2.2. 실험방법

회분식 실험은 수돗물로 제조한 양액이 들어 있는 5 L 비커에 산소를 3 L/min의 유속으로 공급하면서 플라즈마 반응시켜 고농도의 플라즈마 수를 미리 제조하였다.

고농도 플라즈마 수의 TRO (Total Residual Oxidants) 농도를 측정 후 미리 제조한 양액에 혼합하여 각 비커 당 TRO 농도가 0.05~0.3 mg/L가 되도록 희석하였다. 3일 후 플라즈마 수를 다시 혼합하고 플라즈마 처리에 따른 상추의 성장을 확인하고 다시 3일이 지난 후 다시 TRO 농도를 0.05~0.3 mg/L로 맞춘 양액에 *Fusarium* 8.3 x 10⁶ CFU/mL을 투입하여 시간의 경과에 따른 TRO 변화와 *Fusarium* 불활성화 성능을 평가하였다. 그리고 양액만 있는 대조군(control)과 양액에 플라즈마 처리수를 첨가하지 않은 *Fusarium* 첨가수도 같이 실험하여 비교하였다.

간헐 연속 불활성화 실험은 2차에 걸쳐 실험하였으며, Fig. 1과 같은 양액재배 시스템을 이용하여 실험하였다. 1차 실험은 수조(70 L)에 양액을 농도에 맞추어 투입하고 대조군은 양액만 투입, *Fusarium*단과 플라즈마 처리단도 양액과 *Fusarium* 농축액을 5 mL 투입하였다. 플라즈마 처리단은 이틀 주기로 30분 처리하는 플라즈마 처리단과 60분 처리하는 플라즈마 처리단으로 구성되어 있다. 2차 실험은 1차 실험과 동일한 조건에서 실시하였으며, 이틀 주기 90분 플라즈마 처리단과 하루 주기 30분의 플라즈마 처리단으로 구성되어 있다.

2.3. 분석 및 측정

총잔류 산화제 TRO 농도는 수질분석기(DR2800, HACH)를 이용하여 측정하였다. TRO는 DPD (N,N-diethyl-p-phenylenediamine)을 spectrophotometric method (US EPA method 316)에 의거 530 nm에서 Br₂로 정량하였다.

미생물 계수는 플라즈마 공정을 이용하여 불활성화한 후 시료를 채취하여 PDA (potato extract 4 g, dextrose 20 g, agar 15 g)배지에서 증류수 1 L를 투입하고 25°C에서 5일간 배양 후 colony를 계수하였다. 상추의 길이, 잎 넓이 및 잎 갯수는 각 단에서 총 10개의 모종을 선택하여 주기적으로 직접 측정하여 평균하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분 실험

3.1.1. 플라즈마 처리에 따른 TRO 변화

Zhang et al.(2014)이 연속적인 처리가 아닌 간헐적으로 전기분해 공정을 적용할 경우 양액재배에서 곰팡이

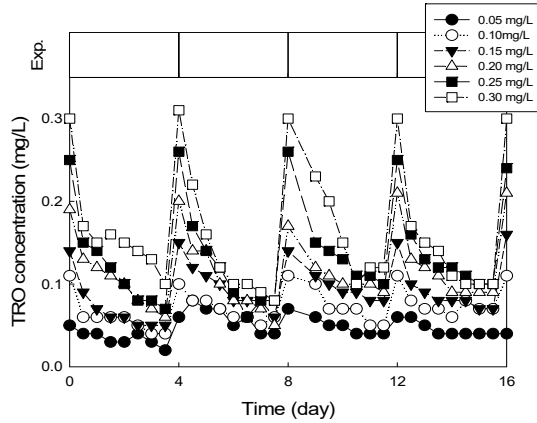


Fig. 2. Variation of TRO concentration in batch experiment.

균을 적절하게 제어할 수 있다고 보고한 결과를 바탕으로 하여 양액재배 포트에서 불활성화 실험을 하기 전 회분식으로 간헐적으로 플라즈마 수를 주입하여 산화제인 TRO 변화를 고찰하고 상추의 성장에 미치는 영향을 살펴보았다. 고농도의 TRO 용액을 투입하여 TRO 농도를 0.05~0.30 mg/L로 0.05 mg/L씩 증가시켜 플라즈마 수 용액을 만든 후, 1 L의 상추가 담긴 비커에 4일의 간격으로 간헐적으로 투입하여 총 5회 투입한 후 각 비커의 TRO 농도 변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2 상단의 그림의 선은 간헐적으로 실험한 것을 나타내는 것으로 실험할 때마다 선으로 표시하였다. TRO 농도는 초기 농도의 높고 낮음에 관계없이 비커에 투입될 때마다 높은 농도를 나타낸 후 빠르게 감소되었고 잔류 TRO가 존재하였다. 0.05 mg/L의 낮은 TRO 용액에서도 4일이 경과하여도 잔류 TRO가 존재하는 것으로 나타났다.

3.1.2. 플라즈마 처리에 따른 *Fusarium* 불활성화

실험 8일째 되는 날 각 비커에 농도가 $\log 6.92(8.3 \times 10^6)$ CFU/mL인 *Fusarium*을 투입한 후 두 번째로 플라즈마 수를 원하는 TRO 농도에 맞게 투입하였다. 플라즈마 처리를 하지 않은 대조군의 경우 *Fusarium*이 2단계로 감소하는 경향을 나타내었다. 초기 3일(실험 11일째)까지 서서히 감소하였으며, 3일 이후부터 빠르게 감소하여 투입한지 8일(실험 16일째)후 $\log 2.69$ 로 감소되었다. 플라즈마 처리구에서는 초기 TRO 농도에 관계없이 거의 직선적인 감소 경향을 나타내었다. 초기 TRO 농도

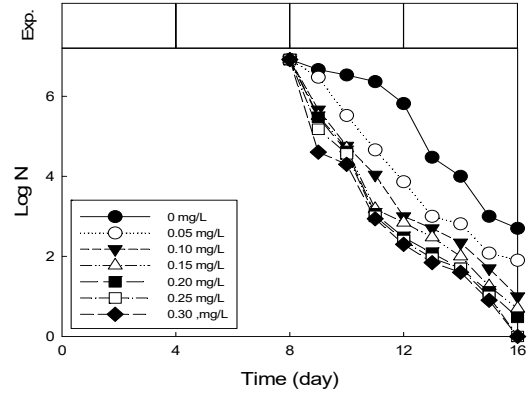


Fig. 3. Variation of *Fusarium oxysporum* concentration in batch experiment.

가 0.05 mg/L에서는 8일후 $\log 1.9$, 0.10 mg/L에서는 8일 후 $\log 1$ 로 나타났다. 0.15 mg/L이상의 플라즈마 처리구에서는 처리 7일(실험 15일째) 후 모두 3 CFU/mL 이하의 *Fusarium*이 나타나 대부분의 *Fusarium*이 4일 간격 3회의 간헐적 플라즈마 처리로 인해 효율적으로 사멸하는 것으로 나타났다. 수중에 존재하는 대조군 속의 *Fusarium*이 예상과는 다르게 사멸하는 것은 토양환경에서 주로 성장하는 *Fusarium*이 수중에 존재하기 때문에 플라즈마 처리를 하지 않아도 자연 감소되는 것으로 판단되었으며, 이에 대한 내용을 규명하기 위해서는 추후 농업 분야 전문가들과 함께 공동연구를 할 필요성이 있는 것으로 판단되었다. 회분식 실험을 진행하면서 상추를 관찰한 결과 1주일 간 2회의 플라즈마 처리 후 상추 잎의 길이나 폭 변화가 없는 것으로 나타나 플라즈마 처리가 상추의 생육에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다.

3.2. 간헐 연속 실험

3.2.1. 연속 실험 1에서 플라즈마 처리에 따른 TRO 변화와 *Fusarium* 불활성화

회분식 실험결과와 양액재배에서 연속적인 플라즈마 처리가 토마토의 성장에 악 영향을 주었다고 보고한 Zhang et al.(2015)의 연구 결과를 바탕으로 연속 실험에서도 간헐적으로 플라즈마 처리를 하여 불활성화 적용 가능성을 살펴보았다. 연속 실험은 양액재배 포트에서

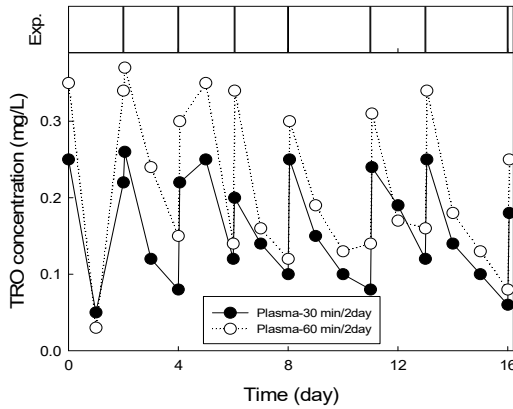


Fig. 4. Variation of TRO concentration with plasma treatment in continuous experiment 1.

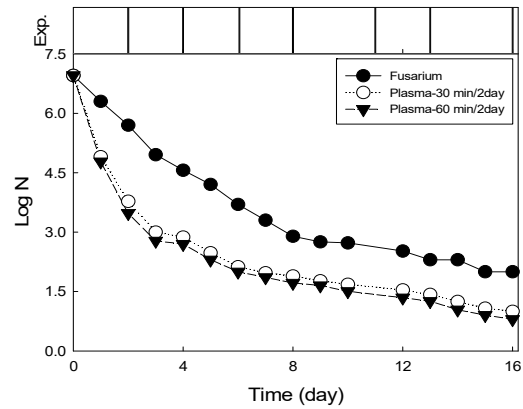


Fig. 5. Effect of plasma treatment type on *Fusarium* sp. disinfection continuous experiment 1.

상추와 같이 실험해야 하므로 한 번에 실험이 곤란하여 실험 1과 2로 나누어 실시하였다. 연속 실험 1은 이를 주기 1회 30분, 60분의 플라즈마 처리, 연속 실험 2는 이를 주기 90분, 하루 주기 30분의 플라즈마 처리로 나누어 실험하였다. Fig. 4에 이를 주기로 30분과 60분 플라즈마 처리한 처리구의 TRO 농도 변화를 나타내었다. 플라즈마 반응기의 순환 유량이 8.3 L/min이기 때문에 30분 플라즈마 처리시 249 L의 물이 순환되면서 처리되어 70 L의 양액이 약 3.6회 순환되면서 처리되며, 60분 처리시 7.1회 순환 처리되는 것으로 나타났다. 30분 처리한 처리구의 TRO 농도는 플라즈마 처리 직후 약 0.25 mg/L이었으며, 다음날 TRO 농도는 0.05 mg/L~0.1 mg/L로 감소하였다. 이를 후 다시 플라즈마를 처리하는 경우 0.25 mg/L로 증가된 후 다시 감소하는 경향을 나타내었다.

60분 처리한 처리구의 경우 처리 직후 TRO 농도는 0.3~0.35 mg/L를 나타내었다. 2일후 플라즈마를 다시 처리하기 직전 TRO농도는 0.08~0.15 mg/L로 나타났다. 플라즈마 처리시간이 증가됨에 따라 처리 직후의 TRO 농도 증가는 물론 플라즈마 재 처리전 TRO 농도는 항상 일정하게 유지되어 잔류소독 효과가 있는 것으로 판단되었다.

Fig. 5에 플라즈마 처리에 따른 *Fusarium*의 개체수 변화를 나타내었다. 초기 *Fusarium* 농도는 9×10^6 CFU/mL (6.95 log)이었으며, 대조군은 *Fusarium*을 투

입하지 않았다. 그림에는 *Fusarium*만 투입한 군, 플라즈마를 이를 주기로 30분간 처리한 군, 60분 처리군만 나타내었다. *Fusarium*만 투입한 구에서는 별다른 처리를 하지 않았음에도 불구하고 지속적으로 감소하여 2주일 후 2 log까지 감소하는 것으로 나타났다. 이는 *Fusarium oxysporum f. sp. fragariae*에 의한 식물 시들음 병은 토양 전염성 병해이기 때문에 펠라이트나 압면 등의 비순환용 배지를 이용하지 않고 스펀지에 상추를 식재한 양액재배이기 때문에 잘 성장하지 못하고 개체수가 감소하는 것으로 판단되었다(Winks and Williams, 1965; Nam, et al., 2011).

플라즈마를 처리하지 않은 대조군의 경우 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 8일까지 빠르게 감소되어 2.89 log로 감소된 후 14일 후는 2.3 log에 도달되는 것으로 나타났다. 30분 처리한 처리구의 경우 2주일 후 최종 *Fusarium* 개체수는 1.24 log(17 CFU/mL)로 감소되었다. 플라즈마를 60분간 처리한 후 이틀간 휴지기를 두고 다시 60분 처리한 경우 *Fusarium* 개체수 2.3 log에 도달되는 기간은 4.5일 부근인 것으로 나타났으며, 2주일 후 최종 *Fusarium* 개체수는 1.04 log(11 CFU/mL)로 감소되었다. 휴지기를 두면서 이틀에 한번 씩 간헐적으로 30분과 60분씩 플라즈마 처리하였을 때 초기 TRO 농도가 높고 잔류 TRO 농도가 높은 60분간 플라즈마 처리구가 30분 처리구보다 *Fusarium* 처리율이 높지만 차이가 크지 않아 이를 주기의 30분씩의 간헐적 플라즈마 처리만으로도

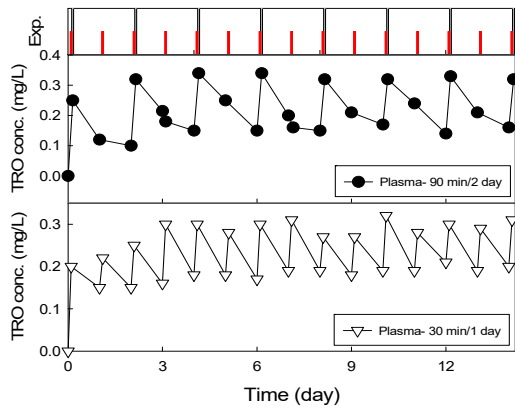


Fig. 6. Variation of TRO concentration with plasma treatment in continuous experiment 2.

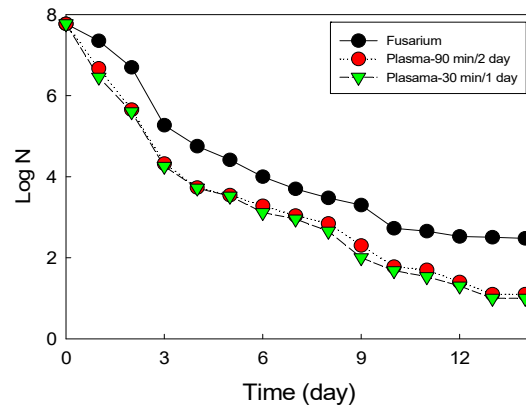


Fig. 7. Effect of plasma treatment type on *Fusarium* sp. disinfection continuous experiment 2.

*Fusarium*이 잘 제거될 수 있는 것으로 판단되었다.

상추 재배단[4단, 대조군(플라즈마 무처리, *Fusarium* 무 투입); *Fusarium* 투입; 플라즈마 30분 처리; 60분 처리]에서 플라즈마 처리가 상추의 길이, 잎 수에 미치는 영향을 살펴본 결과 플라즈마 처리구에서도 처리시간에 관계없이 대조군과 같은 상추 길이 성장과 잎의 성장을 보여주어 플라즈마 처리로 인한 상추의 피해는 없는 것으로 나타났다(data not shown).

3.2.2. 연속 실험 2에서 플라즈마 처리에 따른 TRO 변화와 *Fusarium* 불활성화

연속 실험 2에서는 연속 실험 1에 이어 이틀 주기 90분씩 플라즈마 처리한 것과, 하루 주기 30분씩 처리하여 생성되는 TRO 농도를 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6.에서 이틀 주기 90분 처리한 것은 Fig. 6상단의 긴 선, 하루 주기 30분 처리한 것은 짧은 선으로 표시하였다.

90분씩 플라즈마 처리한 직후 측정된 TRO 농도는 처음 플라즈마 처리를 제외하고 0.32~0.34 mg/L로 나타났다. 플라즈마 처리 후 양액 중의 TRO 농도는 빠르게 감소하였다. 90분의 플라즈마 처리 직전의 TRO 농도는 0.10~0.16 mg/L로 나타나 수중의 TRO가 항상 존재하는 것으로 나타났다. 하루 주기 30분의 플라즈마 처리시 처리 직후의 TRO 농도는 0.25~0.32 mg/L로 나타났다. 하루가 지난 후 플라즈마 처리 직전의 TRO 농도는 0.17~0.19 mg/L로 나타나 플라즈마 처리 직후의 TRO

농도는 이틀 주기 90분 처리가 하루 주기 30분 처리보다 높은 것으로 나타났으나, 플라즈마 처리 직전의 TRO 농도는 매일 30분씩 처리하는 경우의 TRO 농도가 높은 것으로 나타났다.

초기 *Fusarium* 농도 5.9×10^7 CFU/mL(7.77 log)을 투입한 후 *Fusarium*이 있는 재배단에서의 *Fusarium*은 Fig. 7에 나타내었듯이 초기에 7.77 log에서 처음 3일까지 빠르게 감소하여 4.75 log까지 감소한 후 10일에 2.72 log까지 감소하였다. 이후 큰 변화없이 유지되었고 14일 후 *Fusarium* 농도는 2.48 log로 나타났다. 이틀 주기 90분간 플라즈마 처리시 *Fusarium*은 빠르게 감소되었다. 14일 후 최종 *Fusarium* 농도는 1.1 log로 나타나 대부분의 *Fusarium*이 제거된 것으로 나타났다. 하루 주기 30분간 처리한 경우의 *Fusarium* 농도는 이틀 주기 90분간 처리한 경우와 비슷한 *Fusarium* 불활성화 능력을 나타내었다. 14일 후 최종 *Fusarium* 농도는 1.0 log로 나타났다. 하루 간격 30분 플라즈마 처리구의 플라즈마 처리시간은 환산하면 이틀 주기 60분 처리와 같은 처리시간을 가진다. 이틀 주기 90분 처리단과 하루 주기 30분 처리단의 *Fusarium* 처리능력은 그림에서 보듯이 약간의 차이가 나지만 거의 유사한 것으로 나타났다.

이틀 주기 60분 처리와 하루 주기 30분 플라즈마 처리가 상추에 미치는 것을 관찰한 결과 하루 간격으로 30분간 플라즈마를 처리한 경우만 상추의 잎 갯수가 감소하였다. 이는 하루 주기의 플라즈마 처리가 이틀 주기로

처리하는 것보다 상추에는 나쁜 영향을 미친 것으로 판단되었다. 이는 잔류 TRO 농도와 관계있는 것으로 판단되었고 하루 주기보다는 이틀 주기의 플라즈마 처리가 상추의 성장에 영향을 주지 않는 플라즈마 처리법인 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구는 플라즈마 반응 시스템을 이용하여 상추를 재배하는 양액재배 시스템에서 시들음 병균의 불활성화에 대해 고찰하여 다음의 결과를 얻었다.

1) 회분식 플라즈마 처리

플라즈마를 처리하여 TRO 농도를 0.05~0.30 mg/L로 투입한 경우 TRO 농도는 초기 농도의 높고 낮음에 관계없이 빠르게 감소되었다. 0.05 mg/L의 낮은 TRO 용액에서도 4일이 경과하여도 잔류 TRO가 존재하는 것으로 나타났다. 1주일 간 2회의 플라즈마 처리 후 상추의 변화가 없는 것으로 나타났다. 0.15 mg/L이상의 플라즈마 처리구에서는 대부분의 *Fusarium*이 4일 간격의 플라즈마 처리로 인해 효율적으로 사멸하는 것으로 나타났다.

2) 간헐 연속식 플라즈마 처리

모든 간헐적 플라즈마 처리에서 잔류 TRO가 존재하는 것으로 나타났다. 이틀 간격 60분 처리의 잔류 TRO 농도는 0.08~0.15 mg/L, 하루 간격 30분 처리는 0.17~0.19 mg/L로 플라즈마 처리시간이 같아도 이틀 간격보다 하루 간격의 잔류 TRO 농도가 높게 나타났다. 모든 플라즈마 처리구에서 *Fusarium*이 효율적으로 불활성화 되는 것으로 나타났다. 이틀 간격 30분 플라즈마 처리시 14일 후 잔류 *Fusarium* 농도는 1.24 log, 60분 처리구에서는 1.04 log로 나타나 이틀 간격 30분 처리만으로도 대부분의 충분한 것으로 판단되었으나, 10¹ CFU/mL미만의 불활성화가 필요하다면 60분 정도의 처리가 필요할 것으로 판단되었다. 하루 간격 30분 처리구를 제외한 다른 플라즈마 처리구에서 대조군과 같은 상추 길이 성장을 보여주어 플라즈마 처리로 인한 상추의 피해는 없는 것으로 나타났다. 하루 간격 30분 처리의 경우 상추의 잎 갯수가 감소하였다. 이는 잔류 TRO 농도가 다른 플라즈마 처리구보다 높기 때문에 영향을 받은 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 대구대학교 교내연구비의 지원을 받아 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Beak, S. E., Kim, D. S., Park, Y. S., 2011, Disinfection of agricultural microorganisms using plasma process, Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference, 20, 379-381.
- Blog of rural love gardening love, 2008, <http://blog.naver.com/rohmy17>.
- Cheon, Y. S., Park, S. K., Park, J. K., Seo, D. C., Cho, J. S., Heo, J. S., 2009, Evaluation of the water purification efficiency in small-scale constructed wetlands under different hydroponic waste solutions for treating the hydroponic waste solution in greenhouses, 2009 International Symposium on Improving Safety of Agricultural Products, 445.
- Cho, J. Y., Seo, B. S., Chung, S. J., 2000, Present status and prospect of sterilization of nutrient solution for recycled hydroponics, Kor. J. Hort. Sci. Technol., 18, 890-899.
- Hong, S. Y., Kim, J. W., Kang, Y. K., Yang, Y. M., Kang, H. S., 2004, Potato basal stem rot caused by *Pythium myriotylum* in hydroponic cultural system, Res. Plant Dis., 10, 13-16.
- Jung, M. S., Lee, W. T., 2016, Optimization of ultra-violet disinfection research for nutrient solution treatment, Korean Society of Water Environment·Korean Water and Wastewater Society 2016 Joint Conference, 402-403.
- Kim, D. S., Park, Y. S., 2015, Changes in the nutrient components associated with the growth of Lettuce in circulating hydroponic, J. Environ. Sci. Int., 24, 841-849.
- Kim, H. J., Kim, J. H., Nam, Y. I., 1995, Automatic control of pH and EC by programmable logic controller in nutriculture of tomato, J. Bio. Fac., Env., 4, 203-210.
- Kim, J. Y., Hong, S. S., Lee, J. G., Lee, H. J., Lim, J. W., 2008, Occurrence of *Fusarium* wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae* and Cultivar Susceptibility on Lettuce, Res. Plant Dis., 14, 79-84.
- Kim, K. D., 1998, Management of nutrients in circulating

- hydroponics, Prot. Hort., 11, 55-58.
- Lee, S. Y., Lee, S. J., Seo, M. W., Lee, S. W., Sim, S. Y., 1999, Reusing techniques of nutrient solution for recycling hydroponic culture of lettuce, J. Bio. Environ. Con., 8, 172-182.
- Lee, Y. B., Roh, M. Y., 1998, Fruit vegetables circulating hydroponics technology, Prot. Hort., 11, 29-43.
- Nam, K. W., Moon, B. W., Kim, Y. H., Lee, C. H., 2009, Infection route of bacterial wilt of tomato caused by *Ralstonia solanacearum* in hydroponic culture, J. Bio-environ. Control., 18, 171-176.
- Nam, M. H., Kang, Y. J., Lee, I. H., Kim, H. G., chun, C. H., 2011, Infection of daughter plants by *Fusarium oxysporum* f. sp. *fragariae* through runner propagation of strawberry, Kor. J. Hort. Sci. Technol., 29, 273-277.
- Winks, B. L., Williams, Y. N., 1965, A Wilt of strawberry caused by a new form of *Fusarium oxysporum*. Queensland, J. Agric. Animal Sci., 22, 475-479.
- Zhang, M. C., 2015, A Study on the inactivation of *Fusarium* Using filtration-Plasma process in recirculating hydroponic systems of Tomatoes, Master Thesis, Catholic University of Daegu.
- Zhang, M. C., Kim, J. W., Do, H. H., Park, J. H., Yun, D. K., Kim, D. S., Park, Y. S., 2014, Fungal inactivation of plant factories using intermittent electrolysis process, Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference, 23, 378-382.

• 박영식, 대구대학교 창조융합학부 교수
ysparkk@daegu.ac.kr