Journal of Environmental Science International
33(5): 323~332; May 2024

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2024.33.5.323

ORIGINAL ARTICLE

토마토 수경재배에서 플라즈마를 이용한 시들음병균(*Fusarium oxysporum f.* sp.) 불활성화

김동석 · 박영식[1)*]
대구가톨릭대학교 보건안전학과, [1)]대구대학교 자유전공학부

Inactivation of Wilt Pathogen(*Fusarium oxysporum f.* sp.) using Plasma in Tomato Hydroponic Cultivation

Dong-Seog Kim, Young-Seek Park[1)*]
Department of Health and Safety, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 38430, Korea
[1)]Division of Liberal Studies, Daegu University, Gyeongbuk 38453, Korea

Abstract

Circulating hydroponic cultivation has the advantage of reducing soil and water pollution problems caused by discharge of fertilizer components because the nutrient solution is reused. However, cyclic hydroponic cultivation has a low biological buffering capacity and can cause outbreaks of infectious root pathogens. Therefore, it is necessary to develop technologies or disinfection systems to control them. This study used dielectric barrier discharge plasma, which generates various persistent oxidants, to treat *Fusarium oxysporum* f. sp., a pathogen that causes wilt disease. Batch and intermittent continuous inactivation experiments were conducted, and the results showed that the total residual oxidant was persistent in intermittent plasma treatment at intervals of 2-3 days, and *F. oxysporum* was treated efficiently. Intermittent plasma treatment did not inhibit the growth of tomatoes.

Key words : Dielectric barrier discharge plasma, Hydroponic cultivation, Inactivation, Total residual oxidants, Wilt pathogen

1. 서 론

우리나라에서 1990년대 초중반부터 시작된 양액재배는 기존 토양재배에서 생육에 필요한 비료 성분을 녹인 양액을 암면(Rock wool), 펄라이트(Perlite) 등으로 만든 배지나 물에 공급하여 재배하는 방법이다. 양액재배는 작물의 생산성을 높일 수 있는 장점이 있어 재배면적이 점차 증가하고 있다(Park et al., 2021).

양액재배는 양액의 순환방식에 따라 비순환식과 순환식 양액재배법이 있는데, 비순환식 양액재배는 미리 제조된 양액을 공급하므로 양액조절이 용이하지만, 작물에 이용되지 않고 버려지는 양액으로 인한 양액 비용이 증가하며, 폐기되는 양액에 의해 잉여 비료 손실은 물론 토양이나 관개수로 유입되어 수질오염을 일으키기 쉽다(Kim, 1998; Part at al., 2021).

반면, 순환식 양액재배는 양액을 재사용하기 때문에 물과 비료물질의 소비를 줄여 생산비가 절감되고, 폐기되는 양액이 적어 질소나 인산 등의 비료 성분의 배출량을 줄일 수 있어 비료 성분으로 인한 토양오염과 수질오염 문제를 감소시키는 장점이 있다(Price and Nolan,

Received 2 April, 2024; **Revised** 28 April, 2024;
Accepted 10 May, 2024
***Corresponding author** : Young-Seek Park, Division of Liberal Studies, Daegu University, Gyeongbuk 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.

1984). 그러나 순환식 양액재배법은 생물적 완충능력이 낮아 역병, 청고병, 입고병, 위조병 등과 같은 뿌리 전염성 병원균이 문제가 되고, 다른 작물로 이동되면 병원균이 빠르게 확산하여 높은 전염 위험성이 내재되어 있어 방제할 수 있는 기술 또는 소독시스템 개발이 필요하다(Nam et al., 2009; Zhang, 2015).

양액재배시 발생하는 병원균의 방제를 위해 토양재배에서 사용하는 방법인 뿌리 부위에 직접 관주 처리하는 방법을 양액재배에 이용할 경우 침투 이행성이 큰 약제는 뿌리를 통해 작물체 내로 흡수가 계속되어 열매나 잎 등에 축적되어 약해를 입을 가능성이 높고, 수확 후 가식부위에 잔류농약이 과다하게 존재할 가능성이 매우 높은 것으로 알려져 있다(Lim et al., 2002).

따라서 양액 중에 존재하는 병원균 방제를 위한 방법은 약제를 사용하지 않고 다른 방법을 사용하고 있다. 양액처리용 수처리 공정은 열처리, 모래 여과, UV 조사, 플라즈마, 염소 소독, 오존 소독 등 다양한 수처리 방법이 제시되고 있지만, 공정에 따라 pH 변화, 양액성분의 침전, 킬레이트-철 불용화 등의 문제가 발생할 수 있어 적절한 공정의 선택이 중요하다(Choi et al., 2011; Lee and Kim, 2019; Noh et al., 2020).

다양한 소독 공정 중에서 다양한 라디칼과 산화제 등이 생성되는 것으로 알려진 유전체장벽 플라즈마 공정(Dielectric barrier plasma process)은 화학종들의 높은 산화력을 이용하여 난분해성 물질의 산화와 미생물의 불활성화 효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다(Sugiarto et al., 2003; Baek et al., 2012).

본 연구는 순환식 양액재배에 활용하기 위한 공정으로 유전체장벽 플라즈마 공정을 이용하여 작물의 시들음병을 일으키는 병균인 *Fusarium oxysporum f. sp.*의 불활성화를 위한 적용가능성과 작물에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 장치

실험에 사용한 플라즈마 반응기가 설치된 양액재배 시스템의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 양액재배 시스템은 알루미늄 파일로 제작하였으며(가로, 세로 : 1 m, 높이 : 2 m), 재배 포트가 2단 설치된 재배장치를 2대 제작하여 실험에 사용하였다. 양액재배 포트는 각 단마다 36 포기(6단 × 6줄)의 토마토 모종을 재배할 수 있다. 식물 성장용 LED 램프는 식물재배용 cool white 램프로 8,000 – 11,000K의 색온도를 나타내는 LED 램프를 사용하였고, 각 단마다 200개의 LED 램프가 설치되어 있다(Zhang, 2015).

플라즈마 시스템은 방전 전극(내부 전극), 유전체인 석영관, 접지 전극(외부 전극) 및 산기관으로 이루어진 플라즈마 반응기, 슬라이닥스와 네온트랜스로 이루어진 전원 공급장치 및 공기 펌프와 유량조절장치로 이루어진 공기 공급장치로 이루어져 있다(Kim and Park, 2014). 플라즈마 반응기의 부피는 0.94 L이었다. 부피 100 L인 수조에 양액 70 L을 채우고 양액재배 포트에 펌프로 양액을 공급하여 24시간 순환하였다(Zhang, 2015; Park, 2019).

시들음병균은 사상성 곰팡이인 *Fusarium oxysporum f. sp. radicis lycopersici* (KACC 40031)로 농업미생물은행에서 분양받아 이용하였다. 직경 5 mm의 *F. oxysporum* 균사 조각을 떼서 PD broth (potato extract 4 g, dextrose 20 g)에 접종하고 25℃로 유지되는 배양기에서 150 rpm의 속도로 4일동안 진탕 배양하였다. 배양한 액체배지는 4겹의 멸균 거즈로 여과하여 균사조각을 제거하고 분생포자의 현탁액을 준비하였다. *F. oxysporum* 시험 농도는 10^6 CFU/mL로 실험하였다(Zhang, 2015).

2.2. 실험방법

실험은 회분식과 연속식으로 실시하였으며, 회분 실험은 1 L 비커에서 토마토 모종을 넣은 후 실시하였다. 수돗물이 들어 있는 5 L 비커에 플라즈마 방전수를 제조하고, 방전수의 TRO (Total Residual Oxidants) 농도를 측정하고 미리 제조한 양액에 혼합하여 TRO 농도를 다르게(0.1~0.4 mg/L) 희석한 배양액 1 L씩 만들었다. 양액과 방전수가 혼합된 물에 토마토 모종을 넣고 실험하였다. 3일마다 TRO 농도를 맞춘 양액으로 교환하고 각 비커에서의 TRO 변화와 *F. oxysporum* 불활성화 성능 및 토마토 성장을 평가하였다. 그리고 불활성화 실험은 대조군(control)도 같이 실험하여 비교하였다.

간헐 연속실험은 4단으로 이루어진 양액재배 시스템을 이용하여 실험하였다. 1단은 플라즈마 처리를 하지 않고 대조군으로 사용하였으며, 나머지 3단은 플라즈마를 이용하며 소독 처리하였는데, 주 2, 3회의 간격으로 각각 20분, 40분 및 60분간 플라즈마를 방전시켜 소

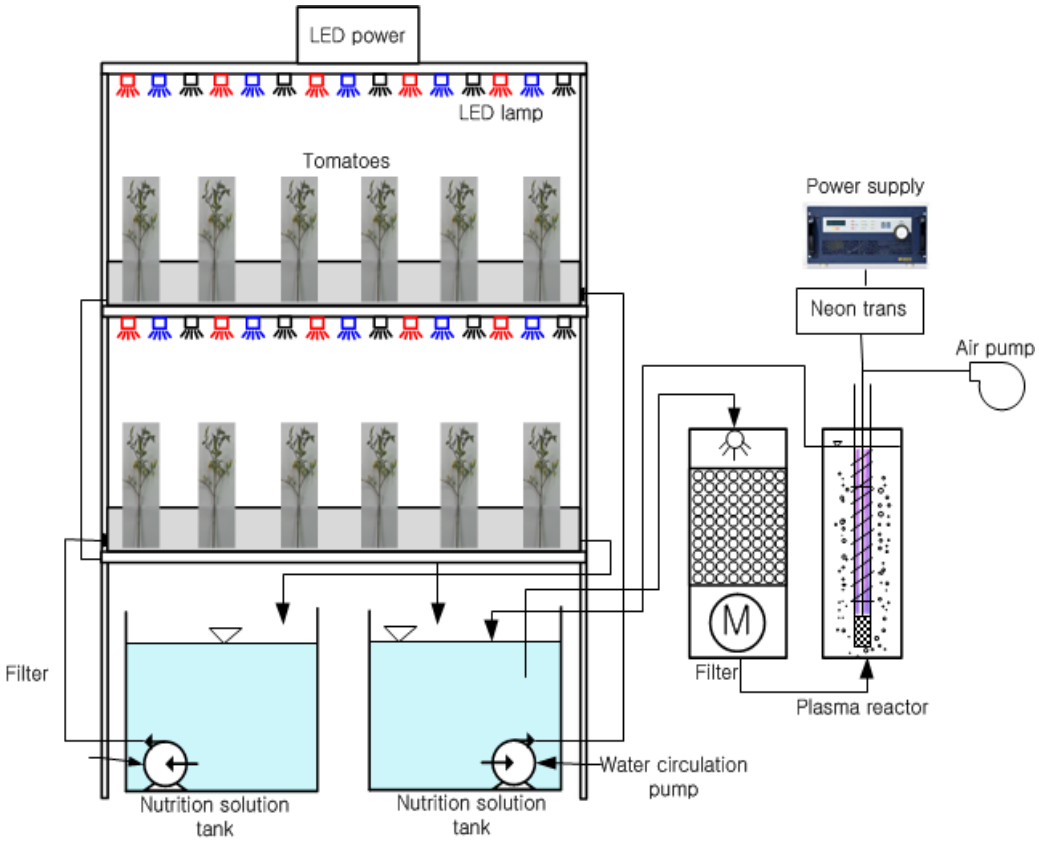

Fig. 1. Schematic diagram of nutriculture system and plasma system.

독 처리하였다. 모든 재배 단에 *F. oxysporum*를 접종한 후 간헐 연속 실험을 수행하였으며, 각 단에서 TRO 변화와 *F. oxysporum* 불활성화 성능 및 토마토 성장을 평가하였다(Zhang, 2015).

2.3. 분석 및 측정

전기분해나 플라즈마가 방전되면 다양한 라디칼과 산화제가 발생하는데 이들 산화제 종류를 총칭하는 잔류산화제를 측정하여 산화제 농도를 간접적으로 평가한다. 이에 이용되는 것이 TRO이다(Kim et al., 2012). 플라즈마를 이용하여 살균하는 본 소독 시스템도 플라즈마 방전에 의해 생성되는 총 산화제의 지표로 TRO를 측정하여 사용하였다. 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 Br^2로 정량하였다(Park and Kim, 2019). *F. oxysporum* 계수는 소독 실험한 시료를 PDA (potato extract 4 g, dextrose 20 g, agar 15 g) 배지에 넣고 25℃에서 5일간 배양 후 colony를 계수하였다. 토마토 모종의 길이와 무게는 각 단에서 총 10개의 모종을 선택하여 주기적으로 직접 측정하여 평균하였다(Park, 2019).

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분식 실험

3.1.1. TRO 농도 변화와 *F. oxysporum* 불활성화

고농도의 플라즈마 방전수 용액을 희석하여 초기 TRO 농도가 0.1~0.4 mg/L인 플라즈마 방전수 용액(토마토 모종과 양액 함유)을 만들어 회분식 소독실험

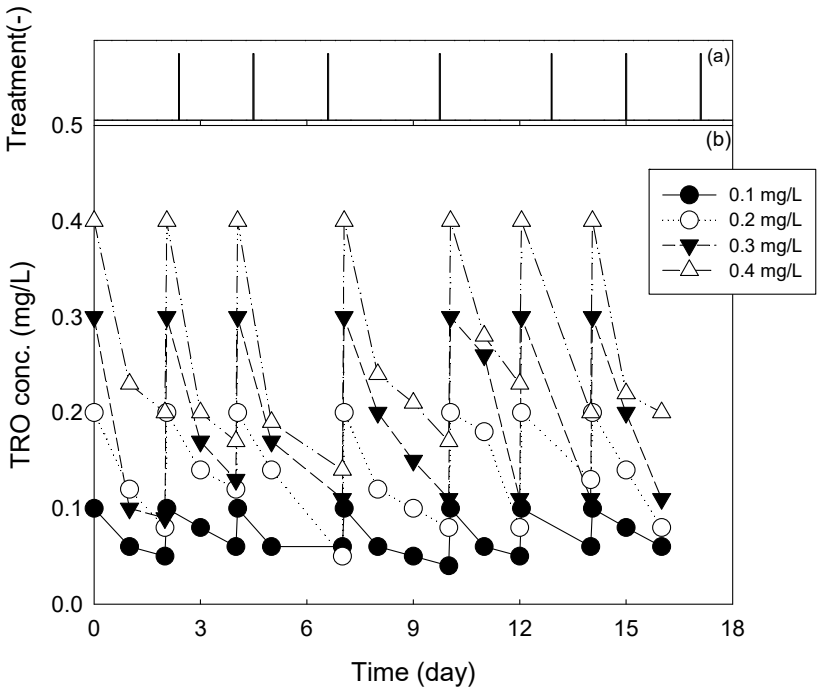

Fig. 2. Variation of TRO concentration by plasma treatment in batch experiment.

을 하였다. 방전수가 담긴 1 L 비커에서 2~3일의 시간 간격으로 플라즈마 방전수를 교체하여 비커에 공급하였을 때 시간에 따른 TRO 농도 변화를 Fig. 2에 나타내었다. TRO 농도는 초기 농도와 관계없이 시간이 경과됨에 따라 빠르게 감소하였다. 0.1 mg/L 용액에서도 2~3일 경과시마다 잔류 TRO 농도는 0.05~0.06 mg/L가 존재하는 것으로 나타났다. 0.2 mg/L에서는 잔류 TRO 농도는 0.07~0.08 mg/L, 0.3 mg/L에서는 잔류 TRO 농도는 0.10~0.11 mg/L, 0.4 mg/L에서는 3일 경과 후 잔류 TRO 농도는 0.17~0.21 mg/L가 존재하여 실험한 모든 초기 TRO 농도에서 잔류성이 있는 것으로 나타났으며 0.4 mg/L의 잔류성이 가장 높게 유지되는 것으로 나타났다. 이와 같은 잔류성은 플라즈마 방전수는 OH 라디칼과 같은 수명이 매우 짧은 산화제 뿐만 아니라 과산화수소, 오존, 및 염소계 산화제 등이 같이 존재하기 때문에 이와 같은 잔류성을 나타낸다고 판단되었다(Kim and Park, 2013).

1주일간 3회의 플라즈마 처리 후 육안 관찰하였을 때 토마토 모종은 변화가 없는 것으로 나타났다. 실험 첫날 각 비커에 *F. oxysporum*을 투입한 후 TRO 농도가 다른 플라즈마 방전수(0.10~0.40 mg/L)를 투입하여 불활성화 실험을 행하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 초기 *F. oxysporum* 농도는 5.6 x 10^6 CFU/mL이었으며, log를 취한 결과 6.75이었다. 대조군(Control)은 시간에 따라 *F. oxysporum* 농도가 서서히 감소하는 것으로 나타났으며, 13일 후 log 4.47로 나타났다. 초기 TRO 농도가 0.10 mg/L인 플라즈마 처리군은 거의 직선적으로 감소하였으며, 13일에 log 1.6, 0.20 mg/L은 log 1로 나타났다. 0.20 mg/L이상의 TRO 농도에서는 13일 후 잔류 *F. oxysporum* 농도가 모두 log 1 (10 CFU/mL) 이하로 나타나 대부분의 *F. oxysporum*이 총 7회의 간헐적 플라즈마 처리로 인해 사멸이 이루어지는 것으로 나타났다. 대조군 속의 *F. oxysporum*이 서서히 사멸하는 것은 비커 내에서의 환경이 *F. oxysporum*의 성장에 좋은 환경이 아니기 때문의 것으로 판단되었다(Nam et al., 2011). 회분식 실험에서 TRO 농도가 0.4 mg/L는 3회의 플라즈마 처리로 대부분의 *F. oxysporum*이 사멸되는 것으로 나타나 0.2~0.3 mg/L로 처리하는 것이 가장 좋은 TRO 농도라고 판단되었다.

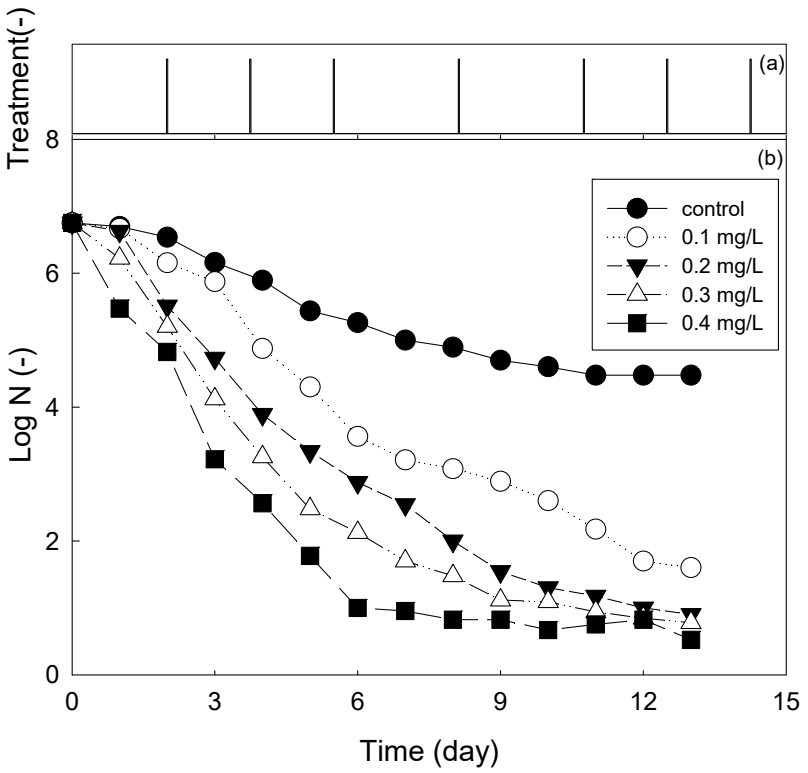

Fig. 3. Variation of *F. oxysporum* concentration in batch inactivation experiment.

3.1.2. 토마토의 변화

회분식 플라즈마 처리 시 방전수가 토마토의 생육에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 대조군과 플라즈마 처리군에서 토마토 6포기를 임의로 선정하여 무게와 길이를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 대조군에서는 처음 높이 250 mm에서 17일 경과후 240 mm로 성장을 멈추고 성장이 아주 서서히 감소하였다. 플라즈마 처리군 0.1 mg/L에서는 처음 311 mm에서 17일 경과 후 270 mm로 감소하였다. 0.2 mg/L와 0.3 mg/L의 경우 처음 311 mm와 264 mm에서 실험 종료시 각각 272 mm와 262 mm로 나타났다. 0.4 mg/L 처리군의 경우 처음 340 mm에서 6일까지 변화가 없었으나 7일 이후 감소하여 17일째 280 mm로 감소하였다. 0.1 mg/L 처리군의 경우 길이가 플라즈마 처리로 인해 길이가 짧아졌을 수 있으나, 0.1 mg/L보다 TRO 농도가 높은 0.3 mg/L 처리군에서 길이 변화가 거의 없었기 때문에 플라즈마 처리로 인한 성장 둔화로 보기 어려운 것으로 판단되었다. 0.4 mg/L의 경우는 무게 변화를 같이 고려하여야 할 것으로 판단되었다.

Fig. 4 (c)에 나타낸 바와 같이 플라즈마 처리에 따른 토마토 모종의 무게 변화는 길이와 유사한 경향을 나타내었다. 대조군을 비롯하여 플라즈마 처리군에서의 초기 무게는 각각 80, 98, 87, 85, 104 g이었으며, 17일 후 80, 85, 83, 82, 91 g으로 나타났다. 육안 관찰결과 토마토 모종의 겉모습과 뿌리의 모습은 대조군과 처리군 모두 차이가 없는 것으로 나타났고, 뿌리의 손상이나 잎의 시들음은 관찰되지 않아 플라즈마 처리로 인한 길이나 무게 변화가 있는 것으로 판단하기는 어려웠다. 토마토가 성장하지 않은 것은 실험 조건이 토마토의 성장에 적합하지 않은 조건이었기 때문으로 판단되었다. 플라즈마 처리가 식물의 성장에는 영향을 크게 미치지 않은 것으로 생각되었으며, 회분식 실험 결과에 따른 TRO 조건을 연속 실험에 적용할 수 있는 것으로 판단되었다.

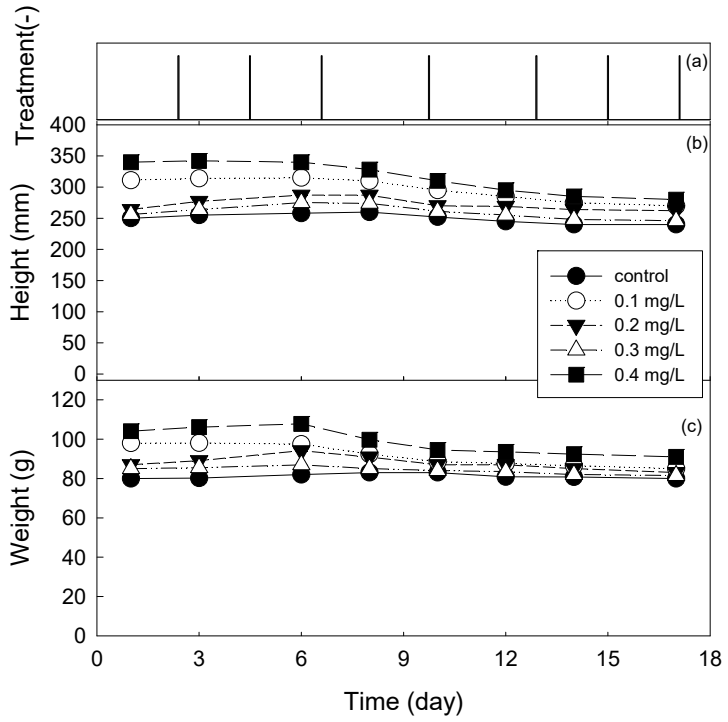

Fig. 4. Effect of plasma treatment on tomato height and weight in batch experiment.

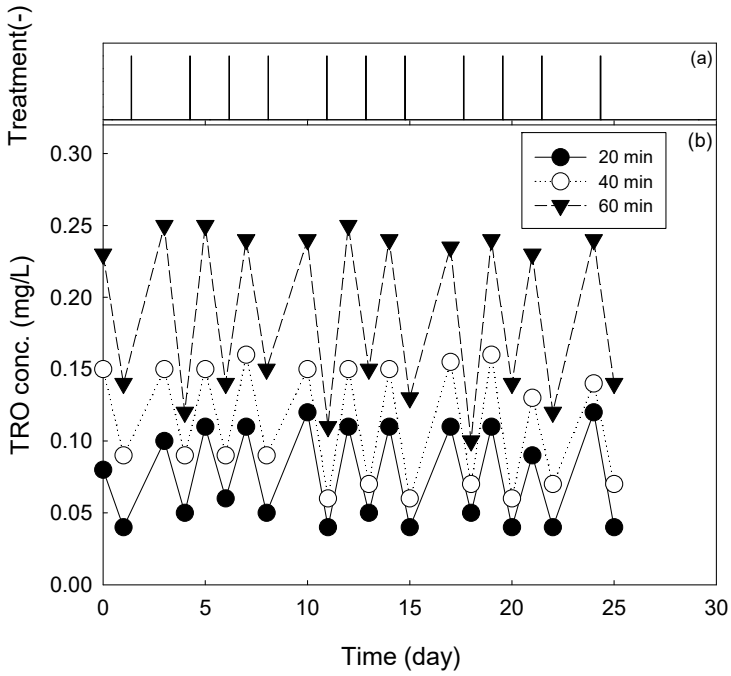

Fig. 5. Variation of TRO concentration by plasma treatment in intermittent continuous experiment.

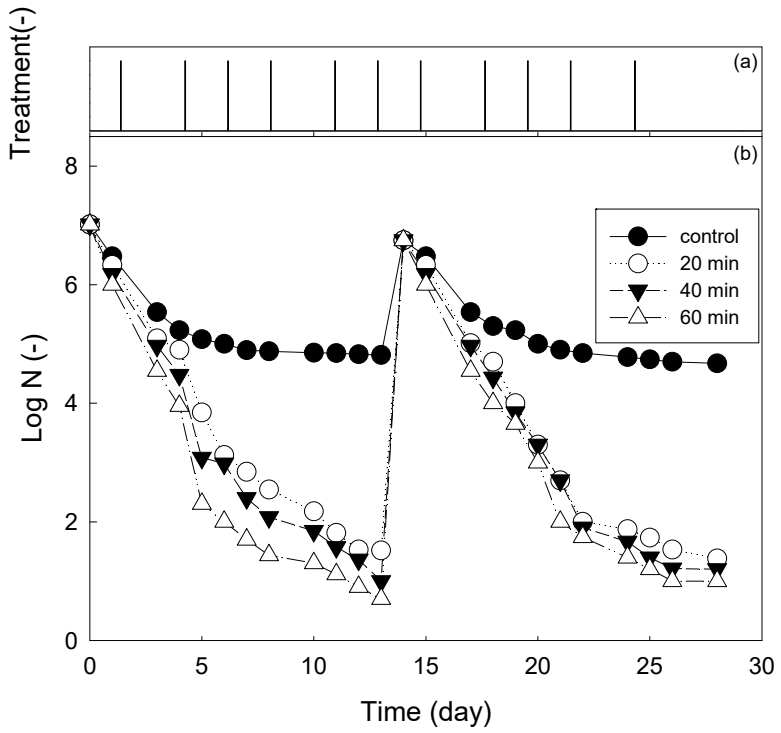

Fig. 6. Variation of *F. oxysporum* concentration in intermittent continuous inactivation experiment.

3.2. 간헐 연속식 실험

3.2.1. TRO 농도 변화와 *F. oxysporum* 불활성화

회분식 실험에서 플라즈마 방전수의 TRO 농도를 0.1~0.4 mg/L에서 2~3일 간격으로 방전처리하였을 때 TRO의 잔류성이 유지되는 것으로 나타났다. 또한 Zhang et al.(2014)는 양액재배 시스템에서 플라즈마를 연속적으로 방전할 경우 상추의 성장을 저해하였다고 보고하였으며, TRO의 잔류성이 나타난 회분식 실험과 Zhang et al.(2014)의 결과를 종합하여 연속 성장실험에서는 플라즈마를 간헐적으로 방전하여 실험하였다.

Fig. 5에 2~3일 간격으로 플라즈마를 각각 20분, 40분, 60분 간헐 처리한 재배단의 TRO 농도 변화를 나타내었다. 1회 20분간 플라즈마 처리시 방전수를 함유한 양액은 약 2.4회 순환하고, 40분은 약 4.8회, 60분은 7.2회 순환된다. 20분 처리시 방전 직 후 TRO 농도는 0.10~0.12 mg/L이었으며, 방전 2~3일 후 0.04~0.05 mg/L로 감소하였다. 이는 2~3일 간격의 간헐적 플라즈마 처리시 1회 처리시와 유사한 농도 변화를 나타내었다. 40분 처리군의 경우 방전 직 후 TRO 농도는 0.15~0.16 mg/L, 방전 2~3일 뒤는 0.07~0.09 mg/L로 유지되었다. 60분 처리한 단의 경우 초기 TRO 농도는 0.23~0.24 mg/L이었고, 2~3일 후 잔류 TRO 농도는 0.11~0.14 mg/L로 나타났다. 20분 처리군의 잔류 TRO 농도는 회분 실험에서 0.1 mg/L 처리군과 비슷하고 40분 처리군의 잔류 TRO 농도는 0.2 mg/L 처리군과 유사한 잔류 TRO 농도를 나타내었다.

Fig. 6에 2~3일 간격으로 20분, 40분과 60분씩 양액에 간헐 플라즈마 처리하였을 때 *F. oxysporum* 개체수 변화를 나타내었다. 실험시작시 투입한 초기 *F. oxysporum* 농도는 7.01 log(1.02×10^7 CFU/mL) 이었다. *F. oxysporum*만 투입한 대조군은 14일 후 4.8 log까지 감소하는 것으로 나타났다. 15일째 되는 날 6.74 log(5.5×10^6 CFU/mL)의 *F. oxysporum*을 다시 투입하였으며, 대조군의 *F. oxysporum*은 29일에 4.67 log까지 감소하는 것으로 나타났다. 대조군에서 *F. oxysporum*에 의한 식물 시들음병은 토양 전염성

병해이기 때문에 펄라이트나 암면 등의 비순환용 배지를 이용하지 않고 스펀지에 토마토를 식재한 양액재배이기 때문에 잘 성장하지 못하고 *F. oxysporum* 개체수가 감소하는 것으로 판단되었다(Nam et al., 2011).

20분의 간헐 방전을 실시한 재배단은 *F. oxysporum* 개체수가 거의 직선적으로 감소하였고, 14일 후 *F. oxysporum* 농도는 1.5 log로 나타나 대부분의 *F. oxysporum*이 제거되어 *F. oxysporum*을 다시 투입한 후 또한 29일 후 *F. oxysporum* 농도는 1.38 log로 충분한 불활성화 효과가 나타나는 것으로 판단되었다. 40분의 방전을 실시한 재배단은 14일 후 *F. oxysporum* 개체수가 1.0 log, 2차 투입한 후 29일째는 1.2 log로 나타났다. 60분 처리군은 다른 재배단보다 초기 5일에 *F. oxysporum*이 2.3 log까지 빠르게 감소하였고, 13일에는 1.0 log까지 감소하였다. 2차 처리에서도 26일째 1.0 log까지 감소하였다. 간헐적 플라즈마 처리시간이 길어지면 잔류 *F. oxysporum* 개체수가 감소하지만 20분 처리군과 60분 처리군의 잔류 *F. oxysporum* 개체수 차이는 1.38 log (20분 처리)와 1.0 log(60분 처리)로 차이가 크지 않아 2~3일간의 간격으로 20분이라는 짧은 플라즈마 방전 처리로 충분한 잔류 TRO를 유지할 수 있고 소독 효과도 지속되는 것으로 판단되었다.

3.2.2. 토마토의 변화

Fig. 7에 간헐 연속식 플라즈마 방전에 따른 토마토 길이와 무게 변화를 나타내었다. 대조군의 토마토 길이는 179 mm에서 29일 후 338 mm로 1.88배, 20분 처리군은 1.5배(256 mm에서 439 mm), 40분 처리군은 1.8배(223 mm에서 412 mm), 60분 처리군은 2.02배(268 mm에서 542 mm) 성장하였다. 플라즈마 처리와 길이 성장과는 상관관계가 없는 것으로 나타났으며, 60분 처리군에서도 길이가 2.02배 증가하였다.

토마토 모종의 무게는 대조군은 42.6 g에서 29일 후 64.4 g으로 1.52배, 20분 처리군은 1.53배(70.6 g에서 107.7 g), 40분 처리군은 1.83배(54.3 g에서 99.1 g), 60분 처리군은 1.80배(55.1 g에서 99.4 g)로 성장하였다. 토마토의 무게는 대조군과 20분 처리군이 비슷하였으며, 40분과 60분 처리군은 무게가 오히려 높아

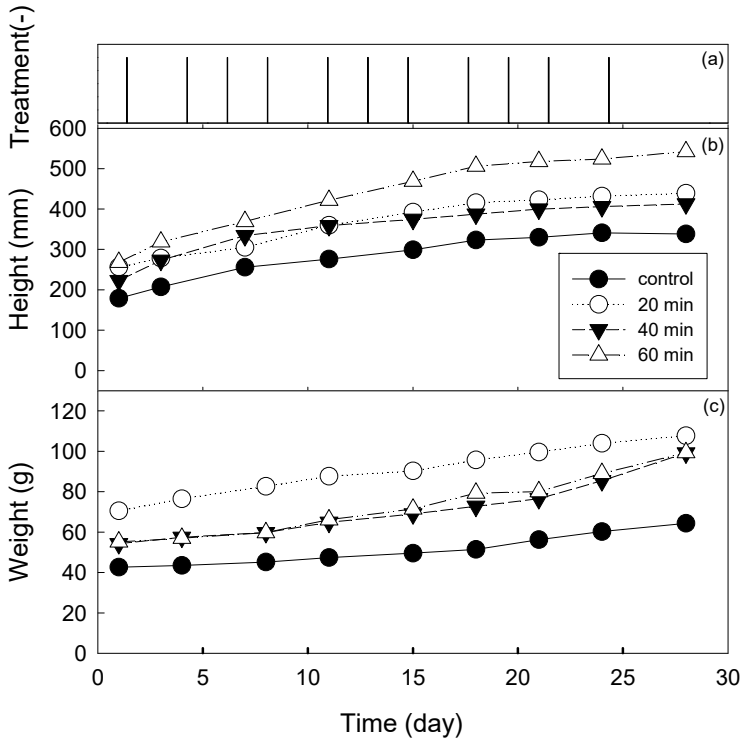

Fig. 7. Effect of plasma treatment on tomato height and weight in batch experiment.

간헐적 플라즈마 처리로 인한 토마토의 성장 저해는 관찰되지 않았다. 이를 확인하기 위하여 뿌리와 잎을 육안 관찰하였을 때 손상은 관찰되지 않아 간헐적으로 플라즈마를 처리할 경우 토마토의 성장을 저해하지 않으면서 효율적으로 병원균을 사멸할 수 있는 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구는 유전체장벽 방전 플라즈마 시스템을 이용하여 토마토 재배 양액재배 시스템에서 시들음 병균인 *F. oxysporum*의 불활성화와 토마토 성장 저해에 대해 고찰하여 다음의 결과를 얻었다.

– 회분식 실험 –

1) 회분식 실험에서 TRO 농도를 0.1~0.4 mg/L로 만든 방전수 용액을 2~3일 간격으로 공급하였을 때 TRO는 초기 농도에 관계없이 시간이 경과 됨에 따라 빠르게 감소하였다. 플라즈마 용액 교환 2~3일 경과 후 TRO를 측정한 결과 모두 잔류성이 있는 것으로 나타났다.
2) 초기 TRO 농도가 0.10 mg/L인 플라즈마 처리군은 13일에 잔류 *F. oxysporum* 농도는 log 1.6로 나타났다. 0.20 mg/L이상의 TRO 농도에서는 13일 후 잔류 *F. oxysporum* 농도가 모두 log 1 (10 CFU/mL) 이하로 나타나 대부분의 *F. oxysporum*이 총 7회의 간헐적 플라즈마 처리로 인해 사멸이 이루어지는 것으로 나타났고, 초기 TRO 농도 0.2~0.3 mg/L로 처리하는 것이 가장 좋은 TRO 농도라고 판단되었다.

– 간헐 연속식 실험 –

1) 토마토가 심어 있는 양액재배 단에 2~3일 간격으로 플라즈마를 각각 20분, 40분, 60분 간헐 처리하였다. 20분 처리군의 잔류 TRO 농도는 회분 실험에서 0.1 mg/L 처리군과 비슷하고 40분 처리군의 잔류 TRO 농도는 0.2 mg/L 처리군과 유사한 잔류 TRO 농도를 나타내었다.
2) 간헐적 플라즈마 처리시간이 길어지면 잔류 *F. oxysporum* 개체수가 감소하지만 20분 처리군과 60분 처리군의 잔류 *F. oxysporum* 개체수 차이는 크지 않아 2~3일 간격으로 플라즈마 처리를 20분이라는 짧은 시간으로 잔류 TRO를 유지할 수 있고 소독효과도 지속되는 것으로 판단되었다.
3) 29일간의 간헐적 연속 실험에서 토마토 모종의 육안 관찰과 길이와 무게 측정에서 플라즈마 처리에 따른 토마토의 성장 저해는 관찰되지 않아 간헐적으로 플라즈마를 처리할 경우 토마토의 성장을 저해하지 않으면서 효율적으로 병원균을 사멸할 수 있는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 대구대학교 교내연구비의 지원을 받아 진행되었으며, 이에 감사드립니다

REFERENCES

Baek, S. E., Kim, D. S., Park, Y. S., 2012, Inactivation of *Ralstonia solanacearum* using aquatic plasma process, J. Environ. Sci., 21, 797-804.

Choi, B. S., Lee, S. S., Awad, Y. M., Ok, Y. S., 2011, Feasibility of reclaimed wastewater and waste nutrient solution for crop production in Korea, Korean J. Environ. Agric., 30, 118-124.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2013, A Study for oxidants generation on oxygen-plasma discharging process discharging system, J. Environ. Sci. Int., 22, 1561-1569.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2014, Inactivation of *Ralstonia solanacearum* using filtration-plasma process, J. Environ. Sci. Int., 23, 1165-1173.

Kim, E. C., Oh, H. W., Lee, S. G., 2012, Consideration on the concentration of the active substances produced by the ballast water treatment system, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 15, 219-226.

Kim, K. D., 1998, Nutrient management in recycling nutriculture, Protec. Hotr., 11, 55-58.

Kim, K. Y., Park, S. M., 2022, Effects of nutrient solution treated with electrostatic water treatment equipment on the growth and fruit characteristics of tomatoe, J. Agri. Life Environ. Sci., 34, 425-432.

Lee, S. Y., Kim, Y. C., 2019, Water treatment for closed hydroponic systems, Korean Soc. Environ. Eng., 41, 501-513.

Lim, Y. B., Lee, J. S., Gyeong, K. S., Kim, C. S., Oh, K. S., KJin, Y. D., Lee, B. M., 2002, Late blight control and pesticide residue characteristics of hydroponically grown tomatoes by chemical irrigation treatment, Korean J. Pesti. Sci., 6, 287-292.

Nam, B. R., Kwak, K. C., 2011, A Design of household water culture system using LED-based artificial sunlight, Proceedings of the Domestic Conference of the Society of Control and Robotics Systems, 641-643.

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-Env. Con., 18, 171-176.

Noh, S. W., Park, J. S., Kim, S. J., Kim, D. W., Kang, W. S., 2020, Effect of plasma-activated water process on the growth and functional substance content of lettuce during the cultivation period in a deep flow technique system, J. Bio Env. Con., 29, 464-472.

Park, B. R., Cho, H. M., Kim, M. S., 2021, Environmental impact of hydroponic nutrient wastewater, used hydroponic growing media, and crop wastes from acyclic hydroponic farming system, J. Korea Org. Resour. Recycl. Asso., 29, 19-27.

Park, Y. S., Kim, D. S., 2019, Derivation of optimal conditions for neutralization of residual oxides (total residual oxidant), Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference, 28, 100.

Park, Y. S., 2019, Inactivation of wilt germs (*Fusarium oxysporum f. sp. radicis lycopersici*) using dielectric barrier discharge plasma in hydroponic cultivation system, J. Environ. Sci. Int., 28, 495-502.

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.

Zhang, M. C., 2015, A Study on the Inactivation of *Fusarium* using filtration-plasma process in recirculating hydroponic systems of tomatoe, Master's thesis, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk, Korea.

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.

• Professor. Dong-Seog Kim
Department of Health and Safety, Catholic University of Daegu
kimds@cu.ac.kr
• Professor. Young-Seek Park
Division of Liberal Studies, Daegu University
ysparkk@daegu.ac.kr