Journal of Environmental Science International
26(1); 109~118; January 2017

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2017.26.1.109

TECHNICAL NOTE

플라즈마 공정과 전기분해 공정의 간헐 운전이 상추성장과 양액 성분에 미치는 영향

김동석 · 박영식[1)*]

대구가톨릭대학교 환경과학과, [1)]대구대학교 기초교육대학

Effects of Intermittent Operation of Plasma and Electrolysis Processes on Lettuce Growth and Nutrient Solution Components

Dong-Seog Kim, Young-Seek Park[1)*]

Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 38430, Korea

[1)]DU University College, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

Abstract

This study was conducted to investigate the effects of intermittent plasma and electrolysis treatments on lettuce (*Lactuca sativa var*. oak-leaf.), nutrient solution components (NO_3^--N, NH_4^+-N, PO_4^{3-}-P, K^+, Ca^{2+} and Mg^{2+}) and environmental parameters (electrical conductivity, total dissolved solids and pH). The recirculating hydroponic cultivation system consisted of planting port, LED lamp, water reservoir and circulating pump. Nutrient solution was circulated in the following order: reservoir → filtration-plasma or filtration-electrolysis → planting port → reservoir. The results showed that nutrient solution components and environmental parameters were changed by plasma or electrolysis treatment. Lettuce growth was not affected by the intermittent plasma or electrolysis treatment with 30 minutes or 90 minutes, respectively. The roots of the lettuce was damaged by excessive plasma and electrolysis treatment. Electrolysis treatment had greater effect on than plasma treatment because of the accumulation of high levels of TRO (Total Residual Oxidants).

Key words : Electrolysis, Lettuce growth, Nutrient, Plasma, Total residual oxidants (TRO)

1. 서 론

양액재배(수경재배)는 배양액의 농도, 용존산소, 온도 등을 조절하여 식물 뿌리의 흡수기능을 최적으로 유지시켜 작물의 생장 제어를 가능하게 하는 재배 시스템이다(Park et al., 1999). 국내의 양액재배는 연작장애의 방지 및 청정채소 수요 충족의 일환으로 1992년에 시작된 이래 생산성 및 품질 향상에 대한 농가의 요구 증대에 힘입어 재배면적이 꾸준하게 증가되고 있으며, 이러한 증가 추세는 당분간 지속될 것으로 추정된다(Kim et al., 2000)

양액재배는 사용한 폐양액을 폐기시키는 비순환식(흘려버림식) 양액재배와 폐양액을 재사용하는 순환식 양액재배로 나눌 수 있다(Kim, 1998). 비순환식 양액재배의 경우 장치가 간단하고 시설비가 저렴하며, pH와 전기전도도에 의한 양액 조절이 용이하다. 또한,

Received 16 August, 2016; **Revised** 27 September, 2016;
Accepted 6 October, 2016
*__Corresponding author__: Young-Seek Park, DU University College, 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.

지하부의 병원균 확산을 방지할 수 있는 장점이 있다(Kim, 1998; Blog of rural love gardening love, 2008; Park and Kim, 2014). 그러나 배지의 적절한 세척을 위해서 양액의 30% 정도를 추가 공급하여야 하기 때문에 양액비의 부담이 가중되며, 주변의 포장에 시비하거나 그냥 배출하고 있는 실정이어서 자원의 낭비뿐만 아니라 지표수나 관개수의 부영양화와 지하수의 오염 등 여러 가지 환경문제를 일으킨다(Ministry of Agriculture, 2001; Kim and Kim, 2002).

폐양액으로 인한 환경오염을 최소화하고 양액재배 시 병원균을 제거하기 위하여, 부족한 비료 성분을 첨가하여 재사용할 수 있는 순환식 양액재배 시스템이 추천된다(Lee et al., 2007). 그러나 양액재배는 배양액 관리의 효율성은 높으나, 제일 큰 문제점은 뿌리의 병 발생에 있다. 병이 발생하면 병원균이 배양액과 함께 순환하여 재배시설 전체를 오염시켜 피해를 입힐 수 있다(Kim et al., 2005). 최근 순환식 양액재배 시스템에서 발생하는 뿌리전염성 병원균을 소독하여 양액 재사용을 위한 양액 소독법으로 열처리, 오존처리, 저속모래여과, 요오드 처리법 및 초음파 처리법 등의 물리화학적 방법이 연구되고 있다(Cho et al., 2000). 본 연구진은 새로운 양액 소독법으로 전기분해와 플라즈마 공정 등 산화제를 발생시키는 처리법을 개발하고 있다. 산화제 발생 소독 시스템을 이용할 경우 소독 공정에서 발생하는 산화제 등이 양액의 성분 변화에도 영향을 줄 수 있기 때문에 부족한 양액성분 첨가시 중요한 기초자료가 된다(Sugiarto et al., 2003; Kim and Park, 2014a). 따라서 양액재배 시스템의 재사용 기술의 확립을 위해서는 소독 공정 적용시 양액 성분의 변화에 대한 고찰이 필요하다.

본 연구는 전기분해 공정과 플라즈마 반응기를 이용한 양액의 소독 공정을 적용하기 전의 기초 연구로써, 양액재배 작물로 상추를 선정하여 순환식 양액재배 시스템에서 전기분해 공정과 플라즈마 반응기를 이용한 소독 공정이 작물과 양액성분 변화에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험방치

2.1.1. 양액재배 시스템

실험에 사용한 순환식 양액재배 시스템의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 순환식 양액재배 시스템은 전기분해 공정과 플라즈마 공정 각각 1 set, 총 set를 설

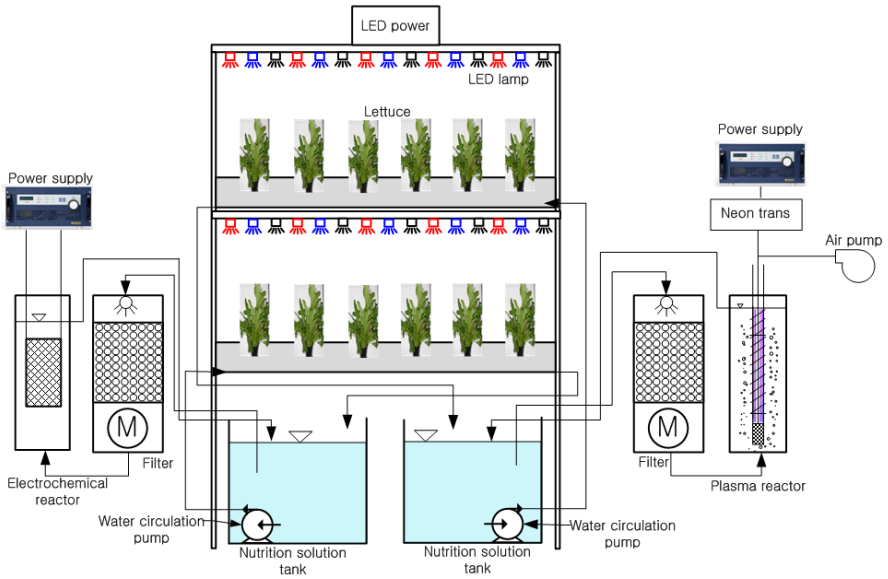

Fig. 1. Schematic diagram of nutriculture system, plasma and electrolysis system.

치하여 운전하였다. 순환식 양액재배 시스템은 가로와 세로가 각각 1 m, 높이가 2 m이며, 양액재배 단이 수직으로 2단 설치되어 있다. 각 단은 6개의 재배 포트로 이루어져 있으며, 각 포트에서는 6개의 재배구가 있어 6 포기의 상추를 재배할 수 있다. 각 재배 단마다 200개의 LED 램프가 설치되어 있으며 LED 램프는 도르래가 설치되어 있는 판에 장착하여 상추의 성장에 따라 높이를 조절할 수 있게 하였다. LED 램프는 식물재배용 cool white 램프로 8,000 ~ 11,000 K의 색온도를 나타내는 LED 램프이다. 점등은 아침 7시에 실시하였고 소등은 오후 6시에 실시하였다. LED 램프가 바닥에서 40 cm 떨어져 있을 때 광량은 6,500 LUX를 유지하였다. LED 램프의 조건은 실험기간동안 일정하게 유지하였다. 양액 순환용 수조의 부피는 100 L이며, 70 L의 양액을 채워 30 W의 수중펌프로 상부의 6개 포트에 양액을 공급한 후 자유낙하에 의해 수조로 다시 유입시켰다.

2.1.2. 플라즈마와 전기분해 반응기 시스템

플라즈마 반응기 시스템은 양액 순환용 수조에서 펌프를 통해 여과조로 물을 유입시켜 여과시킨 후 플라즈마 반응기로 유입시키고 플라즈마 반응을 거친 후 다시 양액 순화용 수조로 유입시켰다. 플라즈마 반응기는 8.3 L/min의 속도로 순환시켰다.

전처리 공정인 여과 반응기는 플라즈마 공정과 전기분해 공정 모두 같은 크기의 반응기를 사용하였다. 여과 반응기는 가로 13.5 cm, 세로 13.5 cm 높이 25.5 cm이며, 여재가 채워지는 유효 부피는 3 L이다. 반응기에 여재를 채우고 물을 채운 후 전원을 공급하면 반응기 상부에서 유입수가 공급되고 하부의 펌프를 통해 유출수가 빠져나가는 구조로 되어 있으며, 물의 흐름은 하향류이다. 실험에 사용한 여과재는 fiber ball을 사용하였으며, fiber ball의 지름이 8.0~8.2 mm이었다.

플라즈마 반응기는 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. 플라즈마 반응기의 부피는 0.94 L이다. 유전체는 두께가 1 mm, 내경이 7 mm인 석영관을 사용하였다. 방전 전극은 직경이 2 mm인 봉 형 전극, 접지 전극은 직경이 1 mm인 전극을 스프링 형태로 만들어 사용하였으며 두 전극의 재질은 모두 티타늄이었다. 반응기에 주입하는 가스로는 공기를 사용하였으며, 공기 펌프에서 발생한 공기를 rotameter를 이용하여 유량을 조절한 뒤 공급하였다. 전원 장치는 2차 전압이 15 kV이고 주파주가 20 kHz인 네온트랜스를 이용하였다. 1차 전압을 140 V로 인가하였으며, 전기분해 반응기는 플라즈마 반응기에 인가되는 전력과 동일한 전력을 인가하였다.

전기분해 반응기의 순환 시스템은 플라즈마 반응기와 같은 구조와 원리로 순환된다. 전기분해 반응기의 부피는 1.73 L이고 63 x 115 mm의 전극 1쌍이 4 mm 간격으로 설치되어 있으며, Ru, Ti 및 Ir이 혼합된 3성분계 전극을 사용하여 실험에 사용하였다.

실험은 양액을 순환시켜 상추를 키우면서 3~4일의 간격으로 주 2회 플라즈마와 전기분해 공정을 30, 60, 90 및 120분 처리하면서 양액의 성분변화, 상추의 성장 및 환경 변화 등을 관찰하였다.

2.2. 양액 성분과 균주

2.2.1. 양액 성분

순환식 양액재배 실험에 사용한 작물은 상추(적오크, *Lactuca sativa var*. oak-leaf.)이었으며, 10월에 파종하여 모종을 키운 후 11월 말에 양액재배 포트로 이식하였다. 실험은 실내에서 이루어졌으며, 수온은 히터를 이용하여 15 ± 1℃ 내외로 유지되게 하였다. 온도는 전 실험기간동안 일정하게 유지되었다.

상추의 초기성장(1~24일)은 일본 야채시험장 표준액을 기준으로 제조하여 사용하였다 (Yu et al., 2006). 성장 25일부터 양액을 시중에서 판매되고 있는 양액으로 교환하여 성장시킨 후 실험에 사용하였다. 시판 양액은 엽채, 화훼용이며, A, B액으로 나누어져 있다. A액의 성분은 전체 500 mL에서 질소는 2%, 수용성 칼리 3.5%, 수용성 칼슘 2%, 수용성 철 0.05% 함유되어 있으며, B액은 질소 1.3%, 수용성 인산 1.5%, 수용성 칼리 5%, 수용성 마그네슘 0.7%, 수용성 붕소 0.05%, 수용성 망간 0.01%, 수용성 아연 0.002%이 함유되어 있다. 사용량은 400배 희석하여 20 L당 50 mL를

첨가하였다. 양액 성분 중에서 질소와 인 성분은 측정하여 보충하였다. 질산성 질소는 KNO_3, 암모니아성 질소는 NH_4Cl, 인산염 인은 KH_2PO_4를 이용하여 보충하였다.

2.3. 분석 및 측정

양액 성분 중 대량 원소인 NO_3^--N, NH^+_4-N, PO_4^{3-}-P는 standard method를 기준으로 측정하였다(APH-AWWA-WPCE, 1995). pH와 총용존고형물(TDS, Total Dissolved Solids) 및 전기전도도(EC, Electric Conductivity)는 각각 pH 미터(Orion, 420A+), TDS 미터(HM digital, com-100) 및 전기전도도 미터(Eutech, Cyberscan PC300)로 측정하였다. 총잔류산화제(TRO, Total Residual Oxidants) 농도는 DPD (N,N-diethyl-p-phenylenediamine) 시약을 이용하여 수질분석기 (HACH, DR2800)를 이용하여 측정하였다. K^+, Ca^{2+} 및 Mg^{2+} 농도는 Perkin Elmer사의 ICP-OES(Optima 7300 DV)를을 이용하여 측정하였다. 양액을 채취하고 GF/C여과기로 거른 후 냉장 보관하여 분석하였다. 초순수를 이용하여 각 이온의 표준물질을 1, 5, 10 mg/L로 조제한 후 검량선을 작성하였다. 샘플은 100배 희석하였으며, 샘플 유량은 1.5 L/min이었다. 상추의 길이, 잎 넓이 및 잎 갯수는 각 단에서 총 10개의 모종을 선택하여 주기적으로 직접 측정하여 평균하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 플라즈마 공정과 전기분해 공정의 운전에 의한 상추의 변화

플라즈마 공정과 전기분해 공정의 운전에 의한 양액과 상추 변화 실험은 2014년 2월 3일부터(0일)부터 3월 21일(46일)까지 실시하였다. Fig. 2에 실험시작시 대조군(control) 상추의 사진을 나타내었다.

양액 소독을 위한 선행 연구에서 본 시스템과 동일한 플라즈마 공정을 이용하여 풋마름병균(*Ralstonia solanacearum*)을 대상으로 소독 실험을 행한 결과 연속운전은 물론 하루 30분 운전과 1일의 휴지기에서도 잔류 산화제 때문에 효과적으로 병원균을 불활성시켰다(Kim and Park, 2014b). 따라서 본 연구에서는 경제적으로 양액을 소독하기 위한 전 단계로써 실제 대상 작물을 상추로 선정하고 간헐 처리를 채택하여 작물에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 3에 3~4일의 간격으로 1회 30분씩 총 4회의

Fig. 2. Photograph of Lettuce was planted in hydroponics port in Feb. 3 (0 day).

(a) Control (b) Plasma (c) Electrolysis

Fig. 3. Photographs of lettuce was planted in hydroponics port in Feb. 21 (18 day).

(a) Control (b) Plasma (c) Electrolysis

Fig. 4. Photographs of lettuce after plasma and electrolysis treatment (24 day).

플라즈마와 전기분해 처리 후 다시 1회당 60분 처리한 직 후의(실험 시작 후 18일 경) 상추 모습을 나타내었다. 모든 단에서 상추는 플라즈마와 전기분해 공정의 영향을 받지 않고 대조군과 같은 정상적인 모습을 보여 주고 있다.

Fig. 4에 1회당 60분씩 총 3회의 플라즈마와 전기분해 처리를 수행한 후, 실험 24일에 대조군과 플라즈마 처리구 및 전기분해 처리구의 상추 사진을 나타내었다. 대조군과 플라즈마 처리구의 상추 상태는 양호한 것으로 나타났으나, 전기분해 처리구의 상추는 1회 처리직후와는 다르게 대체로 시든 것이 발견되었다. 대조군과 플라즈마 처리구 아래 단의 노란 잎은 성장에 따라 자연스럽게 시든 잎이다.

Fig. 5에 실험 24일 경의 각 조건에서 상추 뿌리부분의 사진을 나타내었다. 대조군과 플라즈마 처리군의 잔뿌리는 포트 외부로 뻗어 나와 있으며, 활성을 가지고 있다는 것을 알 수 있었다. 전기분해 처리군은 잔뿌리가 늘어져 있어 활성이 감소된 것으로 나타났다.

일반적으로 전기분해 반응에서 발생하는 산화제는 ·OH, ·HOO 등의 라디칼, free Cl, ClO_2, H_2O_2, O_3 등의 염소계와 산소계 산화제가 발생하는 것으로 알려져 있다(Kim and Park, 2007). 라디칼은 수명이 짧기 때문에 반응 시간후 잔류 라디칼은 없다고 판단되며, 수중에 잔류하고 있는 산소계와 염소계 산화제가 주로 뿌리에 영향을 주었기 때문에 상추 잎이 시든 것으로 판단되었다.

상추 뿌리의 손상이 관찰된 후 각 상추재배 포트에 전기분해수의 공급을 중지하였다(수조에서는 30일까지 총 4회의 전기분해 실시). 중지 후 6일이 경과되었을 때(실험시작 30일) 상추의 잎과 뿌리의 상태를

(a) Control (b) Plasma (c) Electrolysis

Fig. 5. Photographs of lettuce root after plasma and electrolysis treatment (21 day).

관찰하였다. 상추는 키가 커진 상태였으며 전기분해 시 피해를 입었던 것으로 파악되는 상추 하부의 잎은 시들은 상태를 유지하였고, 누렇게 변한 부분도 보였다. Fig. 6에 상추의 뿌리 부분을 나타내었다. Fig. 5(c)와 비교해볼 때 기존의 피해를 입은 뿌리는 녹아버렸으나 새로운 잔뿌리가 자라나 있는 것을 발견하였다. 이로써 전기분해에 의해 피해를 입었더라도 잔뿌리가 완전히 죽지 않은 경우 회복이 가능하지만, 양액 소독을 위한 처리가 재배 작물에 영향을 주면 안되기 때문에 실험 30일 째 전기분해 반응을 완전히 중지하였다. 전기분해 반응의 경우 간헐 처리에서 상추에 피해를 주지 않는 조건은 주 2회 30분 처리인 것으로 나타났다.

Fig. 6. Photographs of lettuce root after electrolysis treatment (30 day).

플라즈마 처리의 경우 주 2회 60분 처리는 상추에 피해를 입히지 않았다. 처리시간을 증가시켜 90분 동안 플라즈마를 처리한 처리구에서도 상추의 피해는 없는 것으로 나타나 42일 되는 시점에 처리시간을 2시간으로 증가시켰다.

플라즈마를 주 2회 120분동안 처리한 지 7일이 경과한 시점에 상추의 모습(49일)을 Fig. 7에 나타내었다. 대조군[Fig. 7(a)]의 상추는 웃자라서 상부 1/2 지점의 잎들은 싱싱하였으나 하부 1/2 지점의 상추 잎들은 시들었다. 상추의 총 길이는 45 cm에 이르렀고 상업적 가치는 거의 없는 상태인 것으로 나타났다. 반면 120분의 플라즈마 처리구[Fig. 7(b)]의 잎을 보면 상추가 피해를 입는 것으로 나타났다. 상추의 최상부는 시들지 않았지만 상부 1/4 지점부터 하부까지 모든 잎들이 시든 것으로 나타났다. Fig. 7(c)에 나타낸 상추의 뿌리는 전기분해 1시간 처리시와 마찬가지로 잔뿌리의 활성이 줄어든 것으로 나타났다.

본 실험에 사용한 유전체방벽방전 플라즈마(dielectric barriwer discharge plasma)는 ·OH, O_3 등이 발생하고 UV가 조사되는 것으로 알려져 있다(Cho, 2008). 플라즈마에서 발생하는 산화제가 상추 뿌리의 활성에 영향을 주는 것으로 판단되었다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 전기분해와 플라즈마 반응에서 발생하는 산화제의 잔류성을 고려할 때 잔류성이 있는 산화제가 더 많이 발생하는 전기분해 공정이 뿌리에 미치는 영향이 더 큰 것으로 판단되었다.

Fig. 8에 실험기간 전체에 대한 상추의 길이, 잎 넓이 및 잎 갯수의 변화를 나타내었다. 최상부의 그림은 시간에 따른 간헐적 플라즈마와 전기분해 처리시기를 나타내었으며, 자세한 사항은 Fig. 9에 나타내었다. 상추의 전체 길이가 240~278 cm인 상태에서 실험을 시작하였다. 전기분해 처리구의 경우 25일에 최고 길이에 도달한 후, 29일에는 상추의 길이가 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 전기분해 처리로 인해 상추가 피해를 입었기 때문이라고 판단되었다. 대조군과 플라즈마

(a) Control (b) Leaf (c) Root

Fig. 7. Photographs of lettuce and root after plasma treatment (49 day).

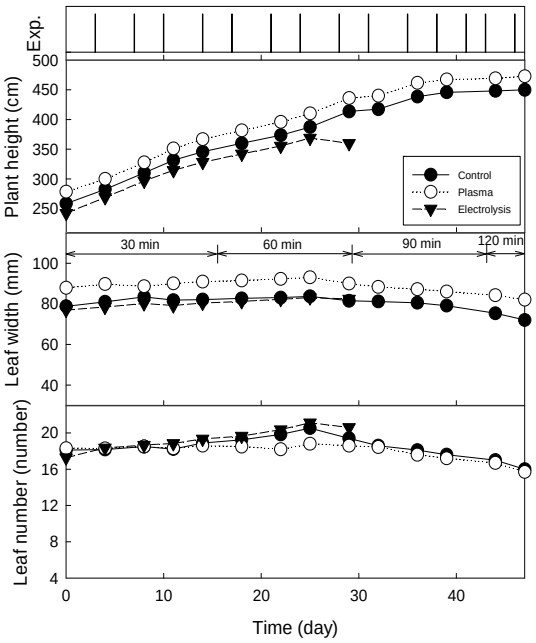

Fig. 8. The length, width and number of the leaf of lettuce with the growth of lettuce.

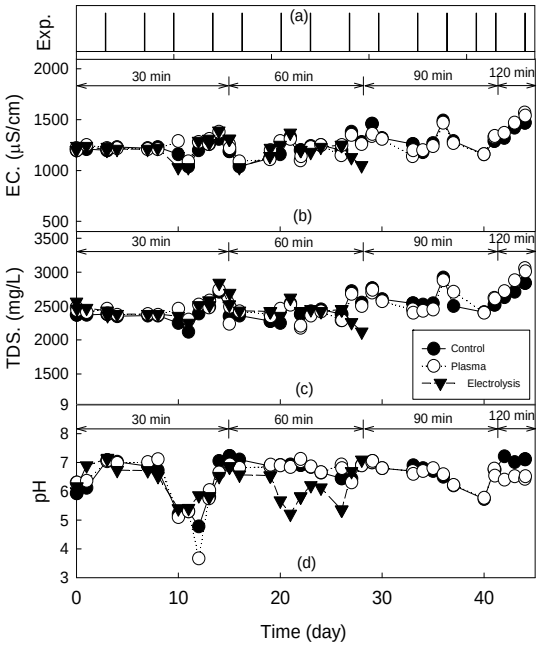

Fig. 9. Variation of water quality with plasma and electrolysis treatment.

처리군의 경우 35일까지 직선적으로 상추가 성장하였으며, 35일 이후에는 성장이 거의 멈추는 것으로 나타났다. 플라즈마 처리구가 대조군과 거의 같은 성장 경향을 보이는 것은 플라즈마 120분 처리 2회 후인 48일에 상추 길이를 측정하였고, 피해는 49일에 관찰되어 길이 측정에는 반영되지 않았기 때문이다. 또한 대조군 상추의 상태가 좋지 못하여 모든 실험을 중단하였기 때문인 것으로 판단되었다.

플라즈마 처리시 주 2회 90분 처리까지는 상추는 영향을 받지 않지만 120분으로 처리시간을 늘렸을 경우 상추에 큰 피해를 입히는 것으로 나타났다. 전기분해 처리와는 다르게 플라즈마 처리 후 상추가 회복되는 것을 관찰하지 않은 것은 상추의 상태가 계속 나빠졌기 때문이다. 또한, 상추를 키운지 4개월 이상이 되었기 때문에 대조군 상추도 상태가 좋지 않아 실험을 중단하였기 때문이다.

잎 넓이는 재배기간에 따라 큰 영향이 없이 거의 일정하게 유지되었으며 30일 이후부터는 느린 속도로 넓이가 줄어드는 것으로 나타났는데, 이는 플라즈마나 전기분해 처리보다는 오랜 성장기간으로 인한 원인이 큰 것으로 판단되었다.

잎 갯수의 경우 25일까지 매우 서서히 증가하다 25일 이후 평균 잎 갯수가 줄어드는 것으로 나타났다. 이도 대조군에서도 관찰되었듯이 플라즈마와 전기분해 처리에 의한 영향보다는 오랜 성장기간으로 인한 것으로 판단되었다.

3.2. 플라즈마와 전기분해 처리에 따른 EC, TDS 및 pH 변화

Fig. 9에 플라즈마와 전기분해 처리에 따른 상추 재배 양액의 수질 변화를 나타내었다. 플라즈마와 전기분해 적용시간을 바꿀 때마다 새로운 양액으로 실험하였으며 실험 중간에는 부족한 수량을 보충하거나 모자라는 성분을 보충하지 않고 실험하였다. Fig. 9 (a)에 플라즈마와 전기분해 처리 실시 순서를 나타내었다. 3~4일 간격으로 플라즈마와 전기분해를 실시하였는데 30분의 연속운전은 4회 실시, 60분은 4회 실시, 90분은 4회 실시, 120분은 2회 실시하였다. 전기

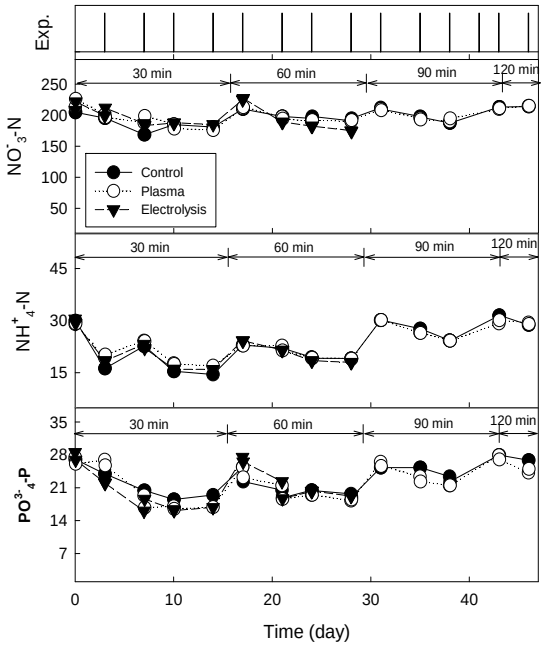

Fig. 10. Variation of hydroponic component with lettuce growth.

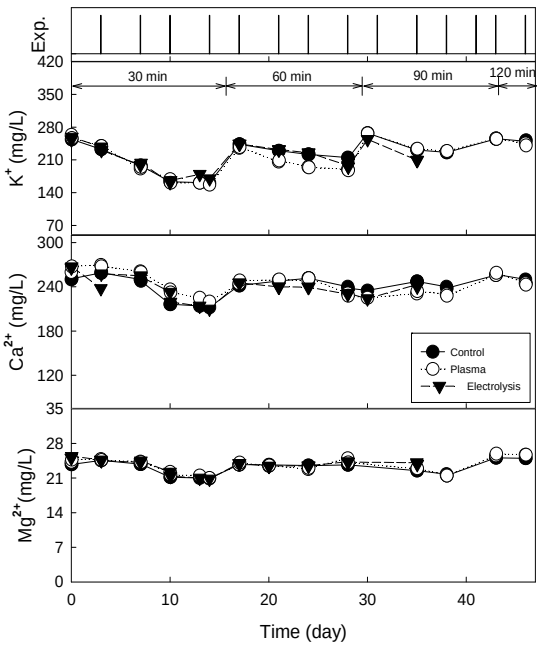

Fig. 11. Variation of hydroponic component with lettuce growth.

분해는 60분까지만 실시하였다.

Fig. 9(b)는 플라즈마와 전기분해 처리동안 전기전도도(EC) 변화를 나타내었다. 운전에 따라서 전기전도도는 1,000 ~ 1,500 μS/cm로 변화하였다. 전기전도도는 시간의 경과에 따라 약간 감소하는 경향을 보였으며, 양액의 pH 변화시 pH 조정을 위해 첨가하는 NaOH와 H_2SO_4 때문에 전기전도도가 증가되는 것으로 나타났다. Fig. 9(c)에 나타낸 바와 같이 총용존고형물(TDS)도 전기전도도와 같은 거동을 나타내었다.

Fig. 9(d)는 pH 변화를 나타내고 있다. pH는 플라즈마와 전기분해 처리 7일경 빠르게 감소되어 플라즈마 처리구의 경우 pH가 3.5까지 감소되었다. pH의 보정을 위해 pH를 7로 증가시켜 주었다. 대조군과 플라즈마, 전기분해 처리구의 pH변화를 비교하면 플라즈마와 전기분해 처리 때문에 pH가 감소하는 것이 아니라 상추의 성장때문인 것으로 나타났다(Park and Kim, 2014). 전기분해 처리구의 경우 60분 처리시 pH가 5정도까지 감소되어 조절해주었으나 다시 감소하였다. Fig. 9(b), (c), (d)의 전기전도도, 총용존고형물, pH는 대조군과 비교시 거의 변하지 않아 플라즈마와 전기분해 처리가 양액에 미치는 영향은 적다고 판단되었다.

3.3. 플라즈마와 전기분해 처리에 따른 질소, 인 및 양이온 농도 변화

Fig. 10에 플라즈마와 전기분해 처리에 따른 질산성 질소, 암모니아성 질소 및 인산염 인의 농도 변화에 나타내었다. 질소와 인 모두 플라즈마와 전기분해 처리 직 전과 직 후에 측정하였다. 그림에서 보듯이 플라즈마와 전기분해 처리에 따라 질소와 인 모두 매우 낮은 오차범위에서 농도가 변하여 플라즈마와 전기분해 처리가 양액의 질소와 인 농도에 미치는 영향은 거의 없다고 판단되었다. 질소와 인 농도에 영향을 미치는 인자는 시간으로서 플라즈마와 전기분해 처리시 새로운 양액을 투입한 경우 초기 질산성 질소농도는 205~220 mg/L, 암모니아성 질소는 23~30.1 mg/L, 인산염 인 농도는 22~28 mg/L로 나타났다. 질소와 인 모두 초기 양액 투입 후 농도가 감소하였으며, 2주간

약 4회의 플라즈마와 전기분해 처리 후 농도가 낮아진 후 새로운 양액을 투입시 다시 농도가 증가하는 형태로 나타났다. 질소와 인 모두 플라즈마와 전기분해 30분과 60분 처리시인 약 30일까지 농도가 많이 감소되었는데, 이는 기발표한 논문에서 보고하였듯이 상추가 직선적으로 성장하는 시기이기 때문이며(Park and Kim, 2014), 그 이후는 성장이 느려지고 사멸되기 시작하는 시기이기 때문에 질소와 인 농도의 감소가 줄어든 것으로 판단되었다.

Fig. 11은 양액의 무기이온 중에서 농도가 높은 K^+, Ca^{2+} 및 Mg^{2+}의 농도 변화를 나타내었다. 세 이온 모두 플라즈마와 전기분해 공정 처리 전과 직 후 이온 농도를 측정하였다. 그림에 나타났듯이 플라즈마와 전기분해 처리에 따라 세 이온의 농도 변화는 없는 것으로 나타나, 플라즈마 처리와 전기분해 처리가 오온 농도 변화에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다. Mg^{2+}의 경우 시간의 경과에 따른 농도 변화는 크지 않았으며, K^+ 농도 변화가 가장 컸으며 그 다음은 Ca^{2+}로 나타났다. 양이온의 경우도 질소, 인과 같이 상추가 지속적으로 성장하는 30일 정도까지 빠른 감소를 보인 후 그 이후에서의 농도 감소는 줄어들었다.

3.4. 플라즈마와 전기분해 처리에 따른 TRO 농도 변화

Fig. 12에 전기분해와 플라즈마 처리에 따른 양액에서의 산화제 농도인 TRO 농도 변화를 나타내었다. 전기분해 반응의 경우 30분의 반응시간에서 발생하는 TRO 농도는 대략 0.25 mg/L로 시간의 경과에 따라 TRO 농도는 감소하기 시작하였으며, 3일 경과시 대략 0.09 mg/L까지 감소하였다. 60분의 전기분해 반응시 TRO 농도가 0.25 mg/L에서 0.35 mg/L까지 증가하였으며, 시간의 경과에 따라 감소한 후 다시 60분의 전기분해를 실시한 후 TRO 농도가 증가한 후 감소하는 경향을 보였다. 전기분해 60분은 전기분해 30분 실시 때보다 전기분해 직 후 TRO 농도가 높게 나타났고, 전기분해가 진행됨에 따라 잔류 TRO 농도가 증가하여 4회 처리 후 3일이 경과하였을 때 가장 낮은 TRO 농도는 0.18 mg/L인 것으로 나타났다.

플라즈마 공정의 경우 플라즈마 처리 시간을 30분에서 60분이나 90분 및 120분으로 증가시켜도 플라즈마 처리 직후의 TRO 농도는 거의 증가하지 않는 것으로 나타났다. 90분의 플라즈마 처리의 3번째 처리시 가장 낮은 TRO 농도는 0.1 mg/L, 4번째 플라즈마 처리후 가장 낮은 TRO 농도는 0.15 mg/L로 나타났다. 120분의 플라즈마 처리에서 가장 낮은 TRO 농도는 0.15 mg/L로 나타났다. 2회에 걸친 120분의 플라즈마 처리에서 상추의 뿌리 손상은 잔류 TRO 농도가 감소되지 않고 높은 상태로 유지되었기 때문이라고 판단되었다. 전기분해와 플라즈마 처리에서 상추에 영향을 주지 않는 TRO 농도는 초기 반응에서 가장 높은 TRO 농도가 0.26 mg/L 정도이고, 시간경과시 가장 낮은 잔류 TRO 농도가 낮은 0.10 mg/L 이하인 것으로 판단되었다. 전기분해 공정이 플라즈마 공정보다 짧은 처리시간에서 상추에 미치는 영향이 더 큰 것은 전기분해 공정에서 발생하는 산화제의 양이 많았기 때문이며, 이는 Fig. 12에서 관찰되었듯이 플라즈마 공정보다 높은 전기분해 공정의 잔류 TRO 농도가 간접적으로 증명해준다(Kim and Park, 2016).

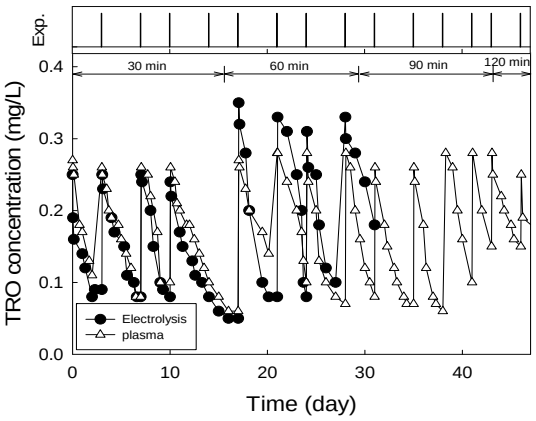

Fig. 12. Variation of TRO concentration with electrolysis and plasma treatment.

4. 결 론

본 연구는 양액소독 공정으로서 플라즈마 공정과 전기분해 공정의 적용을 위한 기초연구로써 재배작물로 상추를 선정하여 두 공정의 간헐적 운전이 상추의 상태와 양액 성분에 미치는 영향을 관찰하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 3~4일의 간격으로 주 2회 30분 처리시 상추의

플라즈마와 전기분해 처리에서 전기분해의 경우, 30분 처리는 상추에 영향이 나타나지 않았으나 60분 처리시 상추의 성장에 피해를 입히는 것으로 나타났다. 플라즈마 처리의 경우, 주 2회 90분 처리시까지 영향을 받지 않지만 120분의 경우 상추에 큰 피해를 입히는 것으로 나타났다. 플라즈마나 전기분해 처리시 뿌리가 공정에서 발생하는 산화제에 의해 피해를 입어 잎까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2) 플라즈마와 전기분해 처리시 전기전도도, 총용존고형물, pH는 대조군의 값과 거의 변하지 않아 플라즈마와 전기분해 처리가 양액에 미치는 영향은 적었다. 또한 플라즈마와 전기분해 처리가 양액의 질소와 인 농도에 미치는 영향은 거의 없으며, 상추의 성장에 따라서만 질소와 인 농도가 감소되었다.

3) 전기분해와 플라즈마 처리에서 상추에 영향을 주지 않는 TRO 농도는 처리 직 후 TRO 농도가 0.26 mg/L이하이고, 휴지기에서 시간경과시 가장 낮은 잔류 TRO 농도가 0.10 mg/L로 사료되었다.

REFERENCES

Blog of rural love gardening love, 2008, http://blog.naver.com/rohmy17

Cho, J. O., 2008, Study in degradation of organic contaminant in wastewater using non-thermal plasma process, Master degree, Cheju National University, Korea.

Cho, J. Y., Seo, B. S., Chung, S. J., 2000, Present status and prospect of sterilization of nutrient solution for recycling hydroponics, Kor. J. Hort. Sci. Technol., 18(6), 890-899.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2007, Electrochemical decolirization of Rhodamine B using dimensionally stable anode, J. Kor. Soc. Wat. Qual., 23(3), 377-384.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2014a, A Study on the inactivation of phytophthora blight pathogen (*Phytophthora capsici*) using plasma process, J. of Environ. Sci. Int., 23(9), 1601~1608.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2014b, Inactivation of *Ralstonia Solanacearum* using filtration-plasma process, J. Environ. Sci. Int., 23(6), 1165-1173.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2016, Comparison of phenol removal between electrochemical reaction and plasma reaction, J. Environ. Sci. Int., 25(7), 905-916.

Kim, H. J., Woo, Y. H., Kim, W. S., Nam, Y. I., 2000, Problem and optimum control of nutrient solution management in closed hydroponics, Kor. J. Hort. Sci. Technol., 18(6), 884-889.

Kim, J. H., Kee, Y. P., Kim, T. J., Kim, S. D., Lee, C. H., Yun, T., 2005, Effect of ozone water on cut flower quality by solution culture Dendranthema grandiflorum, ‘Baegkwang’, Kor. J. Hort. Sci. Technol., 23(3), 301-305.

Kim, K. D., 1998, Management of nutrients in circulating hydroponics, Prot. Hort., 11(1), 55-58.

Kim, Y. C., Kim, K. Y., 2002, Waste utilization technology and government expense sanctions fertilizer salt of hydroponics, Kor. Res. Prot. Hort., 15(2), 20-26.

Lee, K. J., Kang, B. G., Lee, K. Y., Yun, T., Park, S. K., Lee, C. H., 2007, Chemical characteristics of ground water for hydroponics and waste nutrient solution after hydroponics in Chungbuk area, Kor. J. Enveron. Agri., 26(1), 42-48.

Ministry of Agriculture, 2001, Development of procedures for recycling and cleaning of waste nutrient solution from hydroponic culture system, GOVP1200133815, 10-15.

Park, M. H., Shim, M. Y., Lee, Y. B., 1999, Effects of pH level and electrical conductivity on growth, nutrient absorption, transpiration and CO_2 assimilation of leaf lettuce in hudroponics, J. Bio. Env. Con., 8(2), 115-124.

Park, Y. S., Kim, D. S., 2014, Nutrient composition changes in circulating hydroponic with plant growing, Proceeding of the Kor. Environ. Sci. Soc. Conf., 23, 349-353.

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.

Yu, S. O., Choi, K. Y., Jeon, K. S., Bae, J. H., 2006, Development of optimal nutrient solution of Cherry Tomato (*Lycopersicone sculentum* Mill. 'KoKo') in a closed soilless culture system, J. Bio-Env. Con., 15(1), 54-60.