Journal of Bio-Environment Control, 19(4):298-304, (2010)

EC 기준 순환식 파프리카 수경재배에서 시간 경과 및 배액율에 따른 이온농도 변화 분석

안태인 · 신종화 · 손정익*
서울대학교 식물생산과학부 및 농업생명과학연구원

Analysis of Changes in Ion Concentration with Time and Drainage Ratio under EC-based Nutrient Control in Closed-loop Soilless Culture for Sweet Pepper Plants (*Capsicum annum* L. 'Boogie')

Tae In Ahn, Jong Wha Shin, and Jung Eek Son*
Department of Plant Science and Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Abstract. Nutrient uptake by plants and drainage ratio in culture beds can affect ion balance and concentrations of nutrient solutions in electrical conductivity (EC)-based closed-loop soilless culture. This study was conducted to analyze ion concentration changes with time and drainage ratio under EC-based nutrient control in closed-loop soilless culture for sweet pepper plants (*Capsicum annum* L. 'Boogie'). At first experiment, ion concentrations of the nutrient solution were periodically analysed while collected drainage was being reused by mixing with fresh nutrient solution at a dilution rate of EC 2.2 dSm^{-1}. Changes in ion concentrations of K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, NO_3^-, SO_4^{2-}, and PO_4^{3-} were 1.13, 5.35, 0.92, 0.9, 1.10, 0.19 meq $\cdot L^{-1}$, respectively. Ion balance such as $K^+ : Ca^{2+}$ and $SO_4^{2-} : NO_3^-$ were mainly affected during the recirculation of nutrient solution. At second experiment, ion concentrations and EC of drainage were compared before and after replenishment under different four drainage ratios of 7%, 16%, 39%, and 51%. Ion ratios of the recirculated nutrient solutions such as $K^+ : Ca^{2+}$ for cation and $SO_4^{2-} : NO_3^-$ for anion were investigated. ECs of drainage decreased with increase of drainage ratio and each ion concentration showed the same trends as EC did. Ion balances in drainage with drainage ratio were a little different from each other, but each ratio could be corrected by replenishment process. The ion balance at 7% drainage ratio was closest to initial ratio and followed by 16%, 51%, and 39% in the order. Ion balance such as $K^+ : Ca^{2+}$ and $NO_3^- : PO_4^{3-}$ were mainly affected the correction process.

Key words : closed-loop soilless culture, drainage ratio, ion balance, sweet pepper

서 론

인공배지를 이용하는 수경재배는 물리화학적으로 식물의 양수분 흡수에 적합한 조건을 제공할 수 있다. 그러나 배지의 크기가 한정되어 있어 토경에 비하여 근권부의 부피가 상대적으로 작기 때문에, 작은 완충 효과로 인해 양수분의 변화 폭은 상대적으로 커지게 되며 배액에도 그 영향이 미치게 된다. 따라서 안정적인 작물 재배를 위해서는 일정 비율 이상의 배액이 요구되며, 이러한 배액을 연속적으로 이용하는 순환식 수경재배의 양액 관리 기술은 확립되어 있지 않은 실정이다.

양액 내 개별 이온 간의 비율은 해당 작물의 생육에 영향을 주기 때문에, 이러한 순환식 수경재배의 양액관리를 위하여 배액 성분을 연속적으로 측정하고 교정하여 재사용하는 방법이 가장 이상적이라고 할 수 있다. Gieling 등(2005)과 Gutierrez 등(2008) 외 여러 연구자들이 이온 센서를 이용하여 배액의 이온 농도를 제어 하는 실험을 수행하였으나 아직 농가에 적용하기에는 기술적인 한계가 있다. 실용적인 방법으로

*Corresponding author: sjeenv@snu.ac.kr
Received December 1, 2010; Revised December 10, 2010; Accepted December 20, 2010

배액 내 개별 이온의 농도를 실시간으로 측정하는 대신, 배액의 전기전도도(EC)를 측정하여 전체 이온의 농도를 목표로 하는 수준으로 조정하는 방법이 적용되고 있다. 그러나 양액 내 이온의 균형이 일정하게 유지되지 못한다는 문제가 있고, 이러한 결과는 생육에도 영향을 주기 때문에(Ehret 등, 2005), EC에 근거한 순환식 양액관리 방법의 연구가 필요하다.

EC 기준 순환식 수경재배에서 배액은 새로운 양액과의 혼합을 통한 교정의 한계를 결정하는 인자로 작용하며(Savvas와 Manos, 1999), 배액율은 배액의 EC에 영향을 준다(Corwin 등, 2007). 따라서 이 두 가지 변수의 경향을 파악하고 정량화하여 EC 기준 순환식 수경재배의 배액 처리 방식에 적용한다면, 재사용 양액의 사용주기를 안정적으로 최대한 연장할 수 있을 것이다. 본 실험은 파프리카 수경재배에서 EC 기준 순환식 수경재배를 통해 배액을 재사용하였을 때의 이온 비율 변화를 조사하고, 배액율에 따른 이온 비율의 교정 효과를 파악하여 순환식 수경재배에서 재사용 양액의 분석 주기의 규명에 기여하고자 하였다.

재료 및 방법

1. EC 기준 파프리카 순환식 수경재배에서 시간 경과에 따른 이온 농도 변화

2009년 8월 서울대학교 부속농장의 연구용 유리온실에서 파프리카(*Capsicum annum* L. 'Boogie')가 첫 화방이 생성되는 시기에 정식하여 비순환식으로 수경재배를 실시하다가 평균 초장이 약 160cm 일 때 순환식 수경재배 처리를 실시하였다. 배지는 암면(Cultilene, Netherlands)을 사용하였으며, 파프리카는 한 개의 슬라브 당 3주씩 3반복으로 처리하였다. 관수는 일사비례제어 방식을 사용하였으며 누적광량이 $100J \cdot cm^{-2}$가 되었을 때 식물체 한 주당 약 $20mL \cdot min^{-1}$의 유속으로 10분간 점적관수 하였다. 재배기간 동안의 평균 광량은 $415J \cdot cm^{-2} \cdot day^{-1}$이었다. 온도는 최고 36°C에서 최저 22°C 사이에서 유지되었다.

최초 조성 양액의 조성은 K^+ 254, Ca^{2+} 303, Mg^{2+} 76, SO_4^{2-} 315, NO_3^- 1378, PO_4^{3-} 153$mg \cdot L^{-1}$ 이었다. 배액은 배액 저장 탱크에 수집되었으며 공급 설정 EC인 $2.2dS \cdot m^{-1}$까지 원수를 투입하여 EC를 조정한 뒤에 양액 공급 탱크로 옮긴 후 최초 수위에서 증산으로 인해 감소한 부분은 새로운 양액을 투입하고 혼합하여 양액 관수에 사용하였다. 양액 공급 탱크의 부피는 40L이었다. 재사용 양액은 순환식 수경재배 처리 중 8월 15일에서 9월 11일 사이에 수집하여 분석에 사용하였다. 양이온 유도결합플라즈마발광광도기(ICP-730 ES, Varian)로 음이온은 이온크로마토그래프(ICS-3000, Dionex)로 분석하였다.

2. 배액율에 따른 이온농도의 변화 및 양액 혼합에 따른 이온 비율 교정 효과

배액율에 따른 배액의 이온성분 변화를 관찰하기 위해 비순환식으로 수경재배 중인 파프리카를 총 12주 선발하였다. 파프리카는 암면 슬라브 당 각 3주씩 재식되어 총 4개의 암면 슬라브를 실험에 사용하였다. 4개의 배액율 처리(7%, 16%, 39%, 51%)를 적용하였으며, 배액율은 관수량으로 제어하였다 배액은 관수용 양액의 EC인 $2.6dS \cdot m^{-1}$에 기준하여 원수로 희석하였다. 재배기간 동안의 평균 광량은 $475J \cdot cm^{-2} \cdot day^{-1}$ 이었다. 온실 내 온도는 최고 28°C에서 최저 15°C 사이에서 유지되었다.

관수에 사용된 양액의 조성은 이전 실험과 동일한 조성을 사용하였다. 희석된 배액의 성분조정을 위해서 투입할 새로운 양액의 양은 각 처리에 사용한 관수량에서 각 배액량과 원수의 투입량을 제외한 양으로 결정하였다. 발생된 배액과 희석 후 새 양액과 혼합한 배액은 수집하여 양이온은 유도결합플라즈마발광광도기(ICP-730 ES, Varian)로 음이온은 이온크로마토그래프(ICS-3000, Dionex)로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. EC 기준 파프리카 순환식 수경재배에서의 이온농도 변화 조사

양액의 순환이 진행되는 동안 각 이온의 농도가 변화하였다(Fig. 1). Mg^{2+}의 경우 순환 후 최초 샘플 수집 시기부터 감소하였으나, 마지막 샘플 수집 시기에서는 농도가 다시 증가하였다. 그러나 Mg^{2+}의 농도 변화 범위는 약 $0.92meq \cdot L^{-1}$로 다른 양이온들에 비해 상대적으로 농도의 변화 범위가 작게 나타났다. K^+는 초기 농도에 비해서 높은 농도를 유지하다 점차 감소하다 8월 26일 샘플 수집 기간 이후 감소 추세가

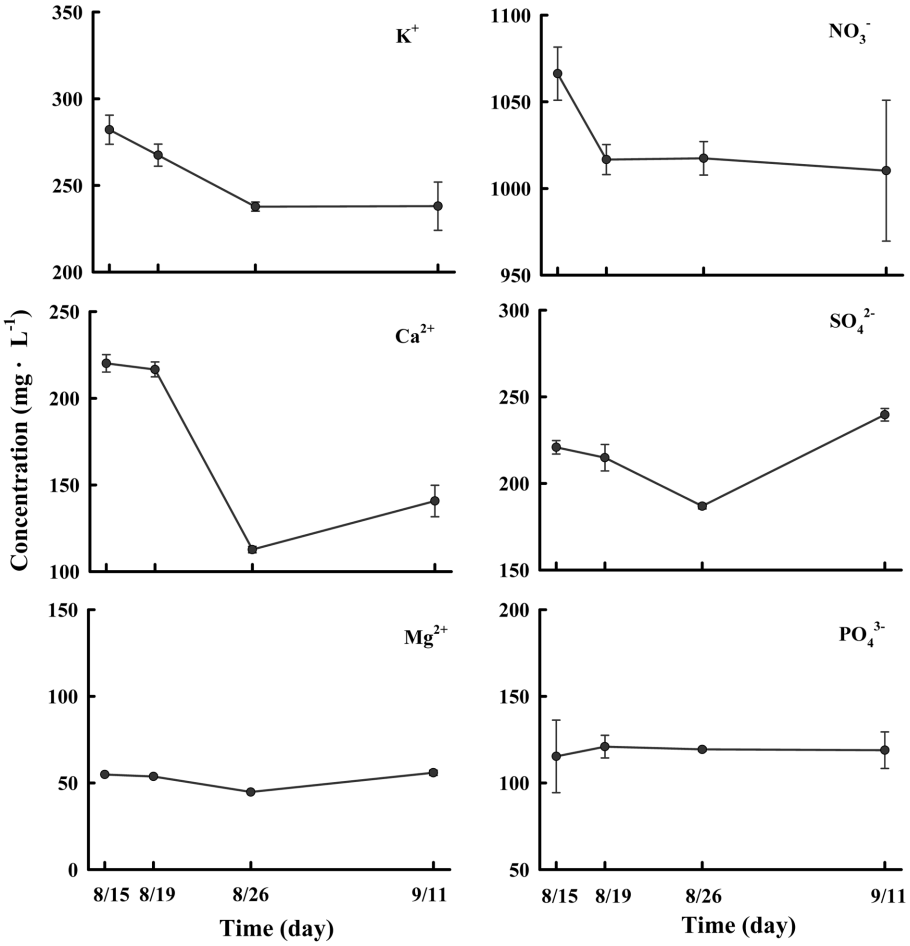

Fig. 1. Change in each ion concentration of the recirculated nutrient solution under EC-based nutrient control in closed-loop soilless culture for sweet pepper plants.

줄어들었다. 양액 순환 처리 기간 동안의 농도 변화폭은 1.13meq · L^{-1}이었다. Ca^{2+}는 Mg^{2+}와 비슷한 경향을 보였으며 5.35meq · L^{-1}로 가장 큰 변화 폭을 보였다.

재사용 양액 내 양이온비율 변화의 경향을 파악하기 위해 Mg^{2+} : K^{+} : Ca^{2+} 당량의 변화를 분석하였다(Fig. 2). 각 이온 변화의 경향은 K^{+}와 Ca^{2+}을 중심으로 Mg^{2+}에 비교적 큰 폭으로 나타났으며 8월 26일과 9월 11일 샘플 수집 시기의 비율이 8월 15일과 8월 19일에 비해 초기 비율과의 차이가 더 크게 벌어졌다. SO_4^{2-}, PO_4^{3-}, NO_3^{-}의 순환 처리 기간 동안의 농도 변화 폭은 각각 1.10, 0.19, 0.9meq · L^{-1}로 나타났으며 SO_4^{2-}와 NO_3^{-} 사이에서의 농도 변화가 PO_4^{3-}에 비해 비교적 크게 나타났으나 Fig. 2에서의 비율 변화는 양이온에 비해 적게 나타났다. Marti and Mills(1991)의 착색단고추의 생육단계에 따른 양분 흡수에 대해서 수행한 실험에서는 K^{+}의 요구도가 상대적으로 높으며 생육단계에 따른 Ca^{2+}의 흡수율의 변화가 Mg^{2+} 또한 생육 단계에 따라 흡수율이 변화되지만 전체적인 비율에서 낮았다. 본 실험에서 양이온의 비율 변화 경향은 파프리카의 양분 흡수 패턴에서 영향을 받은 것으로 사료된다.

2. 배액율에 따른 이온 농도의 변화 및 양액 혼합에 따른 이온 비율 교정 효과

배액의 전체 이온의 농도 변화를 EC의 변화를 이용하여 배액율 처리에 따라 분석한 결과, 배액율이 증가할수록 배액의 EC는 관수되는 양액의 EC 값에 근접하

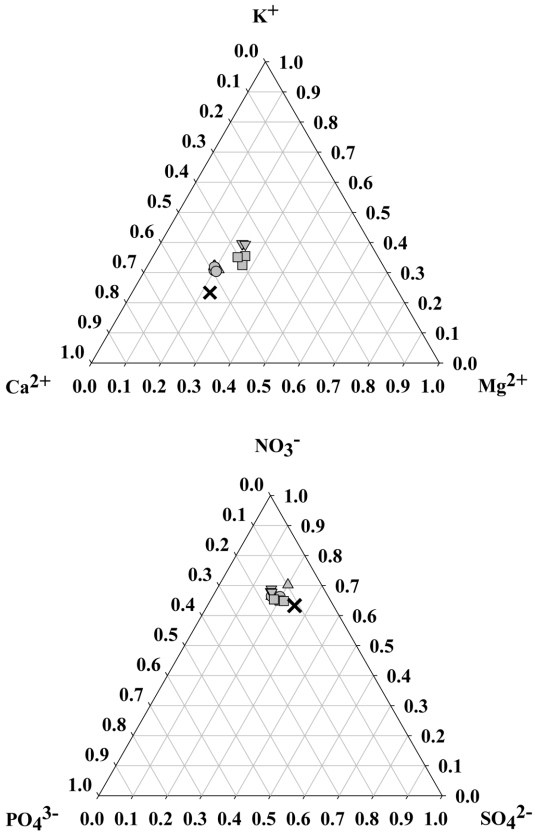

Fig. 2. Changes in cation (top) and anion (bottom) balances of the recirculated nutrient solution under EC-based nutrient control in closed-loop soilless culture for sweet pepper plants (× = initial nutrient solution, ▲ = Aug. 15, ● = Aug. 19, ▼ = Aug. 26, ■ = Sept. 11).

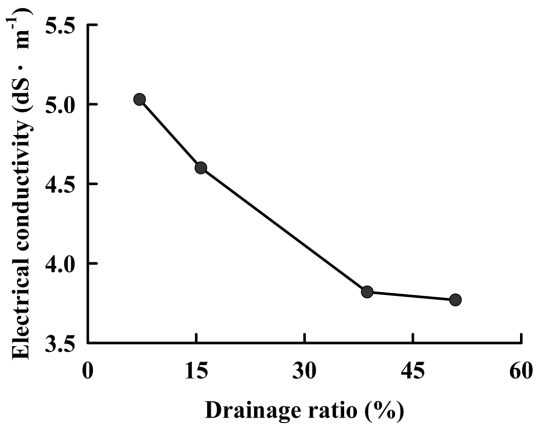

Fig. 3. Relationship between electrical conductivity of drained nutrient solution and drainage ratio in rockwool-based soilless culture for sweet pepper plants.

였다(Fig. 3). 배액율의 증가에 따른 EC가 감소하는 경향은 초기에는 비교적 빠르게 감소하다가 점차 그 기울기가 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 토양 용탈 모델의 경우에서도 배액율과 동일한 의미인 leaching fraction이 증가할수록 배액의 EC가 감소하는 기울기가 작아지는 경향을 보였다(Corwin 등, 2007). 이는 배액량이 증가함에 따라 배액의 부피가 증가하게 되고, 계속해서 배출되는 배액 자체의 이온 농도가 이미 발생한 배액의 농도에 미치는 영향이 점차 작아짐에 따라 나타나는 현상이다. 각 이온의 경우도 배액율이 증가함에 따라 초기 농도로 접근해 가는 경향을 보였다(Fig. 4).

배액율에 따른 배액 내 각 이온 간의 당량 비율 변화를 파악하기 위해 $Mg^{2+}:K^{+}:Ca^{2+}$와 $SO_4^{2-}:NO_3^{-}:PO_4^{3-}$를 삼각도를 사용하여 분석하였다(Fig. 5). 각 이온 간의 비율은 처리 간의 큰 차이는 없었다. 전체적인 변화의 경향은 양이온은 순환식 수경재배에서의 이온 농도 변화 조사 실험에서와 같이 K^{+}와 Ca^{2+}를 중심으로 비슷한 경향을 보였으며, 음이온은 동일한 경향을 나타내지 않았지만 비율 변화 면에서는 NO_3^{-}와 PO_4^{3-}를 중심으로 변하는 경향을 나타내었다.

배액을 희석하여 공급 목표에 맞는 EC로 조정을 한 뒤, 새로 조성된 양액과 혼합하였을 때, 배액율에 따라 점차 간격이 벌어지면서 초기 양액의 비율로 접근해가는 경향을 보였다. 양이온에서는 K^{+}와 Ca^{2+}의 중심으로 변했던 비율이 새 양액과 혼합됨에 따라 점차 초기 비율에 근접하도록 교정되는 효과를 보였다. 음이온의 경우에도 NO_3^{-}와 PO_4^{3-}의 비율이 새 양액의 혼합과 합께 점차 교정됨을 보였다. 초기 양액이 가진 비율에는 배액율에 따라 7%, 16%, 51%, 39% 순으로 근접해가는 경향을 보였다. 이는 배액율이 배액의 성분에 영향을 주는 것을 의미하며 7%, 16% 처리의 경우는 배액에 비해 새로 투입되는 양액의 비율이 높아서 그 영향이 작용했을 것으로 판단된다. 51%의 처리가 39% 처리보다 더 근접한 원인은, 51% 처리에서 암면 배지 내 잔류 염류를 용탈시키고 관수되는 양액으로 교체되어 배액 되고 뒤이어 나오는 배액의 조성이 점차 새 양액의 조성에 근접해 가는 효과를 보았으나 39% 처리의 경우는 이와 같은 효과와 새로운 양액의 투입 비율에 의한 효과가 서로 미미하여 교정 효과가 적었을 것으로 추측된다.

순환식 수경재배에서 배액의 영향은 점차 누적되어

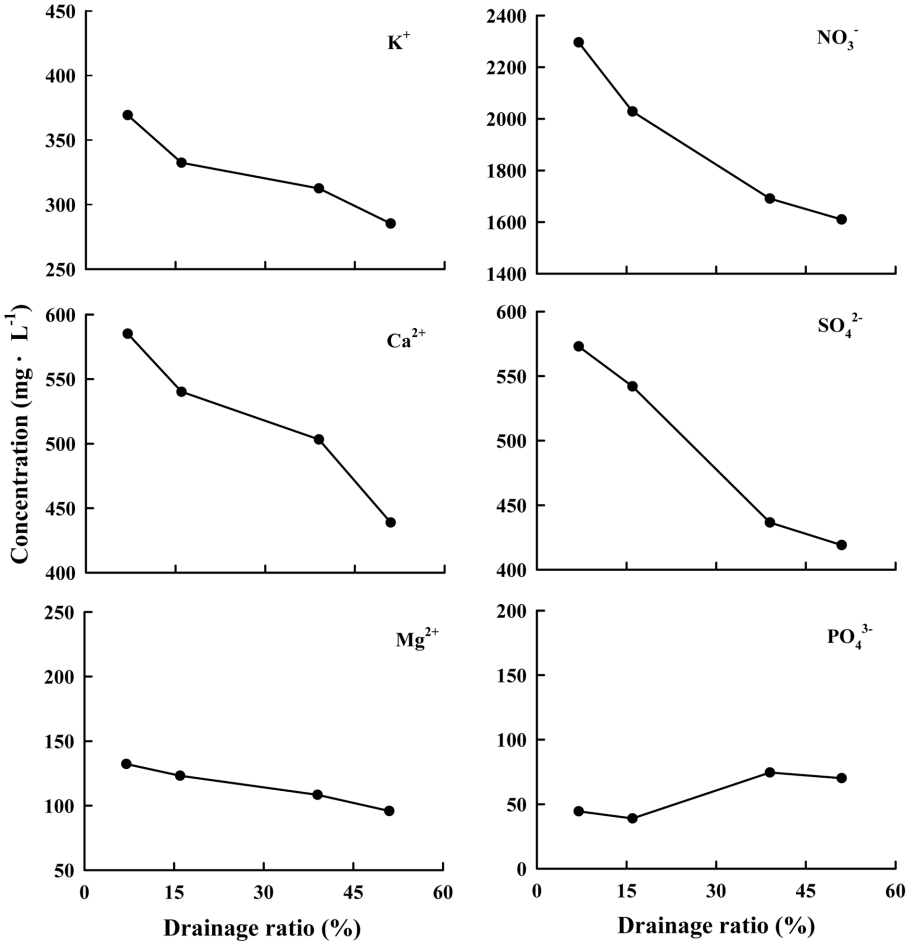

Fig. 4. Change in each ion concentration of the drained nutrient solution at different drainage ratios in rockwool-based soilless culture for sweet pepper plants.

식물에게 작용하게 된다. 따라서 배액의 양분 조성에 영향을 미치는 독립변수를 파악하고 순환식 수경재배 시스템의 관리를 적절하게 하는 것이 필요하다. 식물은 각자의 양분 흡수 방식에 따라서 양분을 흡수하기 때문에 (Sonneveld와 Voogt, 1986), 식물의 양분 흡수는 배지 내 각 이온의 농도에 영향을 미치게 된다. 배액율의 경우는 관수된 양액이 배지 내 잔류한 염류를 용탈시키는 과정에서 이온 농도에 영향을 주게 된다(Corwin 등, 2007). 본 실험에서는 파악된 각 이온의 변화 범위와 경향은 이러한 영향에 의한 결과로 사료된다.

일반적으로 순환식 수경재배 조건이 양액관리가 적절하지 못할 경우에 작물 생육에 불리하지만, 순환식과 비순환식 수경재배를 비교한 실험에서 생육이나 수량에서 유의적인 차이가 나지 않는 경우도 있다(Raviv 등, 1998; Zekki 등, 1996; Ehret 등, 2005). 그러나 지속적인 순환으로 재배기간이 길어지게 되면 양분 불균형으로 인한 효과가 나타난다(Lopez 등, 1996; Zekki 등, 1996; Ehret 등, 2005). 따라서 순환식 수경재배에서는 양분 불균형 여부를 파악하기 위해 재사용 양액을 주기적으로 분석할 필요가 있으며, 이 주기는 생육이나 수량에 부정적인 효과를 미치지 않는 범위로 정할 수 있을 것이다.

EC 기준 순환식 수경재배에서는 양분의 불균형이 나타나는 주기를 연장시킬 수 있는 실용적인 방법은 새로 조성한 양액과 배액과의 적절한 혼합 및 희석에 의한 것이다. 배액의 누적으로 인한 강제 배출이 없는 EC

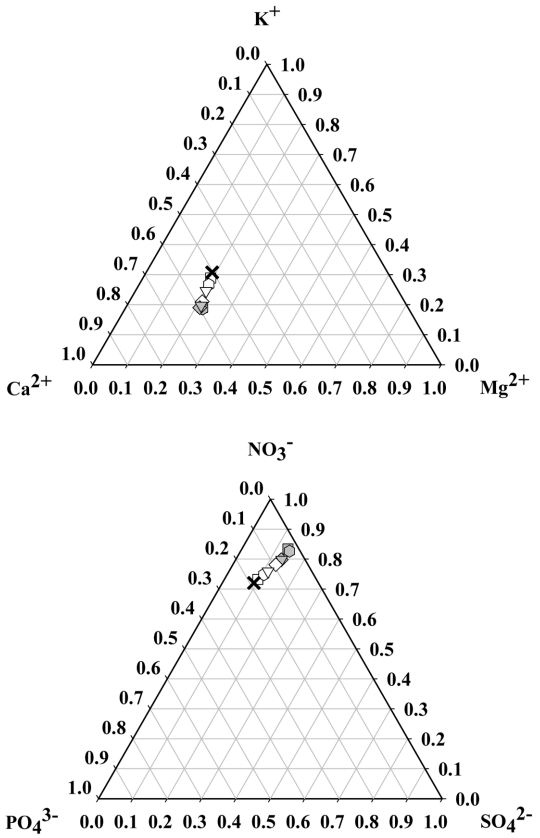

Fig. 5. Ion ratio changes in cation (top) and anion (bottom) before and after replenishment of drainage (× = initial nutrient solution, □ ■ = 7%, = 16%, ◇ ◆ = 39%, and ▽ ▼ = 51%; gray and white symbols mean drainage and replenished drainages, respectively).

기준 순환식 수경재배 방식에서는 배액과 새로운 양액과의 혼합은 배액량과 배액의 EC에 의해서 그 한계가 결정되기 때문이다. 본 실험결과 배액율과 식물의 양분 흡수는 재사용 양액의 농도에 영향을 주고 이는 일정한 경향을 보이며, 순환식 수경 재배에서 작물의 양분 흡수 패턴 및 배액율에 따른 이온 변화 범위를 정량화 한다면 EC 기준 순환식 수경재배 방식의 안정성과 실용성의 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

적 요

EC 기준 순환식 양액재배에서 식물의 양분 흡수와 배액율은 재사용 양액 내의 이온 비율과 농도에 영향을 미친다. 본 연구는 파프리카(*Capsicum annum* L. 'Boogie')의 EC 기준 순환식 양액재배에서 시간과 배액율에 따른 이온 농도의 변화를 분석하기 위해 수행하였다. 첫 번째 실험에서 수집된 배액을 EC 2.2dS · m^{-1}로 조정하고 새로 조성한 양액과 혼합하여 재사용 하고 주기적으로 샘플링 하여 이온의 농도를 분석하였다. 두 번째 실험은 7%, 16%, 39%, 51%의 배액율을 적용하고 배액과 배액을 원수로 희석하고 새로 조성한 양액과 혼합하였을 때의 EC 변화와 이온 농도를 분석하고 비교하였다. 재사용 양액에서의 K^+ : Ca^{2+}와 SO_4^{2-} : NO_3^-와 같은 이온 간의 비율 변화를 조사하였다. 첫 번째 실험에서의 이온 농도의 변화 범위는 각각 K^+ 1.13, Ca^{2+} 5.35, Mg^{2+} 0.92, NO_3^- 0.9 SO_4^{2-} 1.10, PO_4^{3-} 0.19meq · L^{-1}이었다. 이온 간의 비율 변화는 양이온에서는 주로 K^+ : Ca^{2+}을 중심으로 음이온에서는 NO_3^- : SO_4^{2-}을 중심으로 나타났다. 두 번째 실험에서 배액율에 따른 배액의 배액율이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 배액 내 각 이온의 농도도 배액율의 증가에 따른 감소 경향을 보였다. 배액율에 따른 배액 내 이온 간의 비율 변화에는 차이가 없었다. 그러나 배액을 희석하고 새로 조성한 양액과 혼합함에 따라 교정 효과에 차이가 나타났다. 7% 의 배액율이 새 양액의 이온 비율에 가장 근접하였으며, 16%, 51% 39% 순으로 교정되었다. 교정에 따른 이온 비율 변화는 K^+ : Ca^{2+}와 NO^{3-}와 PO_4^{3-}를 중심으로 나타났다.

주제어 : 순환식 양액재배, 배액율, 이온 비율, 파프리카

사 사

이 논문은 농림수산식품부(농림수산기술기획평가원)의 과채류수출공통연구사업단 과제의 일환으로 수행되었음.

인 용 문 헌

1. Corwin, D.L., J.D. Rhoades, and J. Simunek. 2007. Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models. Agr. Water. Manage. 90: 165-180.
2. Ehret, D.L., J.G. Menzies, and T. Helmer. 2005. Production and quality of greenhouse roses in recirculat-

ing nutrient systems. Sci. Hort. 106:103-113.
3. Gieling, T.H., G. van Straten, H.J.J. Janssen, and H. Wouters. 2005. ISE and chemfet sensors in greenhouse cultivation. Sens. Actuator B-Chem. 105:74-80.
4. Gutierrez, M., S. Alegret, R. Caceres, J. Casadesus, O. Marfa, and M.D. Valle. 2008. Nutrient solution monitoring in greenhouse cultivation employing a potentiometric electronic tongue. J. Agr. Food. Chem. 56: 1810-1817.
5. Lopez, J., N. Tremblay, W. Voogt, S. Dube, and A. Gosselin. 1996. Effects of varying sulphate concentrations on growth, physiology and yield of the greenhouse tomato. Sci. Hort. 67:207-217.
6. Marti, H.R. and H.A. Mills. 1991. Nutrient-uptake and yield of sweet pepper as affected by stage of development and N-form. J. Plant Nutr. 14:1165-1175.
7. Raviv, M., A. Krasnovsky, S. Medina, and R. Reuveni. 1998. Assessment of various control strategies for recirculation of greenhouse effluents under semi-arid conditions. J. Hortic. Sci. Biotech. 73:485-491.
8. Savvas, D., E. Chatzieustratiou, G. Peruolaraki, G. Gizas, and N. Sigrimis. 2008. Modelling Na and Cl concentrations in the recycling nutrient solution of a closed-cycle pepper cultivation. Biosyst. Eng. 99:282-291.
9. Savvas, D. and G. Gizas. 2002. Response of hydroponically grown gerbera to nutrient solution recycling and different nutrient cation ratios. Sci. Hort. 96:267-280.
10. Savvas, D. and G. Manos. 1999. Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems. J. Agr. Eng. Res. 73:29-33.
11. Sonneveld, C. and W. Voogt. 1986. Supply and uptake of potassium, calcium and magnesium of spray carnations (*Dianthus-Caryophyllus*) grown in rockwool. Plant Soil 93:259-268.
12. Zekki, H., L. Gauthier, and A. Gosselin. 1996. Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 121:1082-1088.