

EC 기준 파프리카 순환식 수경재배에서 양액 교체 주기에 따른 양액 중의 이온 균형 및 각 이온의 EC 기여도 변화

안태인 · 손정익*

서울대학교 식물생산과학부 및 농업생명과학연구원

Changes in Ion Balance and Individual Ionic Contributions to EC Reading at Different Renewal Intervals of Nutrient Solution under EC-based Nutrient Control in Closed-loop Soilless Culture for Sweet Peppers (*Capsicum annum* L. 'Fiesta')

Tae In Ahn and Jung Eek Son*

Department of Plant Science and Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Abstract. Individual ion concentrations and ionic contributions to EC reading in the circulated nutrient solution are the important factors to be considered for stable EC-based closed-loop soilless culture. This study was conducted to determine appropriate ion-analysis intervals of the circulated nutrient solutions based on ion concentration, ion balance, and ion electrical conductivity under different renewal intervals in EC-based nutrient control systems for sweet peppers (*Capsicum annum* L. 'Fiesta') in early growth stage. Average node numbers of the plants were 13 and 18 when the experiment started and finished, respectively, and three plants were grown in each rockwool slab. Four different renewal intervals of circulated nutrient solutions such as 1, 2, 3, and 4 weeks were used as treatment. Nutrient solutions were supplied to the plants based on integrated radiation. Drainage was collected into drain tanks after irrigation ended in the day and then mixed with fresh water until the EC reaches $2.69 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. The replenished nutrient solution was supplied to the plants in the next day. Ion concentrations of the individual ions periodically analyzed in the circulated nutrient solutions showed no significant differences among the treatments during the experimental period. Ion concentrations of K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , and Cl^- varied within 5-8, 11-14, 2.0-2.7, 0.5-0.6, 14-19, 4-5, 1-4, and 0.3-0.5 $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Ion balance showed a consistent tendency over all the treatments and especially $\text{K}^+ : \text{Ca}^{2+}$ and $\text{SO}_4^{2-} : \text{PO}_4^{3-}$ played great roles in the cation and anion balances in the nutrient solutions, respectively. Activity coefficients of ions such as K^+ , NO_3^- , and H_2PO_4^- varied within 0.8-0.9 and those of Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} varied within 0.5-0.6, showing little changes with time. Ionic contributions of K^+ and NO_3^- to EC reading were the greatest followed by Ca^{2+} , SO_4^{2-} , and Mg^{2+} in the order. From the results, we thought that allowable ranges in ion concentration, ion balance, and subsequent individual ionic contributions to EC reading would be obtained within 4-week renewal interval of nutrient solution in EC-based closed-loop soilless culture for sweet pepper plants.

Additional key words: activity coefficient, equivalent ionic conductivity, ion concentration, rockwool

서 언

인공배지를 사용하는 수경재배에서는 배지 내 염류의 집적을 방지하기 위해서 식물의 증산 요구량 이상으로 양액을 관수하여 일정 비율의 배액을 발생시킨다. 배액은 염류 농도

가 높기 때문에 방류할 경우 환경 부하로 작용할 수 있으며, 비료와 수자원을 낭비하게 된다. 따라서 순환식 수경재배 방식의 적용이 필요하지만 발생된 배액은 관수된 양액과 개별 이온의 농도와 비율이 다르기 때문에, 이온 농도의 조정 없이 배액을 관수용 양액으로 재사용 할 경우 식물영양학적으

*Corresponding author: sjeenv@snu.ac.kr

※ Received 28 December 2010; Accepted 15 January 2011. 이 논문은 농림수산식품부(농림수산기술기획평가원)의 연구과제의 일환으로 수행되었음.

로 불리한 조건이 될 수 있다. 현재 안정적으로 배액을 재사용하는 기술은 확립 되어 있지 않기 때문에 친환경재배 방식을 정착시키기 위해서는 이에 관련된 연구가 필요하다.

순환식 수경재배의 양액관리를 위하여 배액의 개별 이온 농도를 직접 측정하여 관수용 양액으로 재사용하기 위한 연구가 시도되었으나(Gieling et al., 2005; Gutierrez et al., 2008), 기술적인 한계로 인해 아직 실용화에는 미치지 못하고 있다. 따라서 배액 내 개별 이온을 측정하는 대신 전체 이온의 전기전도도(EC)를 측정하여 상대적으로 고농도인 배액을 재사용하는 방식이 실용적으로 도입되고 있다. Savvas(2002)는 국화의 EC 기준 순환식 수경재배에서 식물의 양분 흡수에 기초하여 배액을 처리하는 시스템을 연구하였으며, Savvas and Gizas(2002)는 거베라의 순환식 수경재배에서 배액의 교정에 사용되는 양액의 양이온의 비율을 다르게 하여 생육 효과를 분석한 바 있다.

EC 기준 순환식 수경재배에서 배액의 처리 방식에 따라 양분의 불균형이 발생하는 시기에 효과를 미칠 수 있으나, 양액 내 이온 농도와 이온 균형을 보정할 수 없기 때문에 EC 기준 순환식 수경재배는 비교적 장기간의 재배에서는 식물에게 부정적인 영향을 줄 수 있다(Ehret et al., 2005; Zekki et al., 1996). 그러나 일정 기간의 순환식 수경재배에서 식물 생육에 부정적 영향이 나타나지 않는 경우도 있는데(Ehret et al., 2005; Raviv et al., 1998), 이는 순환식 재배에서 양분의 불균형이 발생하기까지 일정 기간이 소요된다는 것을 의미하지만 명확한 결과는 제시되어 있지 않다. 또한 양액의 EC가 일정한 상태에서 공급되는 양액 중의 각 이온성분과 작물이 흡수하는 이온성분의 차에 의하여 시간 경과와 함께 양액 중의 이온농도가 변하게 된다. 결과적으로 각 이온농도가 양액의 EC에 기여하는 비율도 변화되기 때문에, EC 기준 양액 제어 상태에서 이러한 변화 패턴을 분석할 필요가 있다(Son, 1998).

따라서 안정적인 배액의 사용을 위해서는 재사용 양액을 연속적으로 사용할 수 있는 기간과 이러한 조건에서 시간 경과에 따라서 제어 기준인 EC에 기여하는 각 이온의 효과를 분석할 필요가 있다. 본 연구는 EC 기준 파프리카 순환식 수경재배에서 재사용 양액의 교체 주기를 분석 주기로 가정하고 그에 따른 각 이온 농도의 변화와 이온의 EC 기여도 변화를 파악하여 순환식 수경재배에서 안정적인 양액 분석 주기를 추정하고자 수행하였다.

재료 및 방법

작물 재배 및 환경 조건

서울대학교 부속농장의 연구용 유리온실에서 파프리카

(*Capsicum annum* L. cv 'Fiesta')가 첫 꽃이 생성되는 시기인 8월17일에 정식하여 비순환식으로 수경재배를 실시하다가 마디수가 약 13마디일 때인 9월 24일부터 순환식 수경재배 처리를 28일 동안 실시하였다. 처리 종료 시점의 평균 마디수는 약 18마디였다. 처리 기간 동안의 일일 평균 누적 광량은 $503\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 였으며, 인공배지는 암면(Cultilene, Denmark)을 사용하였다. 유리온실 내 온도는 최고 31°C 에서 최저 12°C 사이에서 유지되었다. 재식밀도는 양호한 수광 조건 하에서 양분 흡수가 가능하도록 일반 재배농가보다 낮은 $1.4\text{주}/\text{m}^2$ 로 설정하였다. 양액은 일사비레제어 방식을 사용하였고, 낮은 재식밀도로 인한 증산량 증가 조건에서 약 30%의 배액율이 가능한 급액 조건을 사전 탐색하여 $100\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 의 누적광량당 작물 1주에 250mL가 공급되도록 설정하였다. 배지 함수율은 급액과 함께 증가되어 배액이 시작되면 암면의 물리적 특성상 배지 함수율은 80-85%까지 증가하였으며, 이후 배액이 진행되는 기간(10분 내외)동안 급액되는 양액은 대부분 배액되었고, 배액율은 약 34%이었다. 배지 함수율은 일중 65%에서 85% 사이에서 변화하였다. 최초 공급한 양액의 조성은 K^+ 7, Ca^{2+} 12, Mg^{2+} 2, SO_4^{2-} 4, NO_3^- 19, PO_4^{3-} $4\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 이었다.

순환식 수경재배시스템 구성 및 급액 조절

순환식 수경재배 장치는 배액 수집탱크, 양액 혼합탱크, 관수장치로 구성하였다(Fig. 1). 배액 수집탱크의 용량은 4L 였으며, 혼합탱크 내의 최고 수위와 최저 수위 사이의 양액

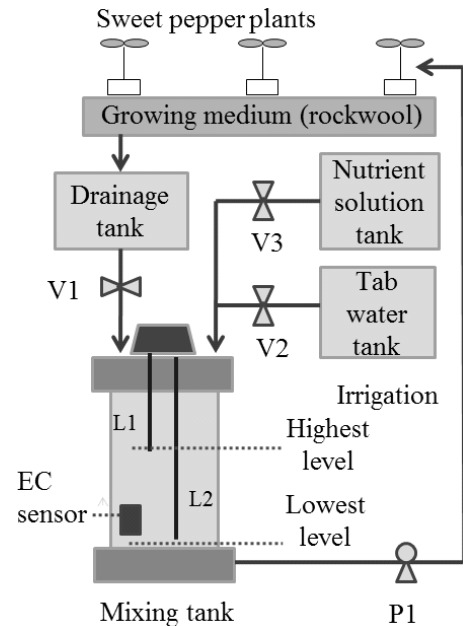


Fig. 1. A diagram of EC-based closed-loop soilless culture module used in the experiment (L1 and L2 = water level sensors, P1 = pump, V1, V2, and V3 = solenoid valves).

체적은 L1 수위센서와 L2 수위센서를 이용하여 3.6L로 유지되었다. 양액은 압력보상형 점적단추와 점적핀을 연결하여 펌프로 공급하였다. 관수 프로그램에 의해 양액 공급 누적량이 증가함에 따라 발생된 배액은 베드 하단에 연결된 배액 수집 탱크에 저장되었다. 하루 중의 관수 프로그램이 종료되면 탱크 하단의 솔레노이드 밸브가 열리면서 수집된 배액은 혼합탱크로 이송된다. 혼합탱크 안에 설치된 EC 센서(SCF-01A, DIK, Korea)는 탱크 안의 EC를 측정하여 2.69 dS·m⁻¹ 이상일 경우에는 원수 공급용 솔레노이드 밸브(V1)를 2초간 열고 150초간 혼합하는 과정을 반복하여 2.69dS·m⁻¹ 이하가 될 때까지 희석 처리가 실시되었다. 희석 과정이 종료되면 EC 2.6dS·m⁻¹의 새로 조성된 양액이 투입되고 L2 센서에 의한 최고 수위가 감지되면 공급이 중단되었다(Fig. 1). 재배 기간 동안의 모든 처리구의 혼합탱크 내 양액의 pH는 6.1- 6.9 사이에서 유지되었다. 혼합된 양액은 익일의 관수에 사용하였다. 배액 처리와 양액 혼합 과정에서의 측정과 제어는 데이터로거(CR1000, Campbell Scientific, USA)를 이용하였다.

양액 교체 주기 처리 및 이온 분석

혼합 탱크 내 재사용 양액의 교체주기를 각각 1주, 2주, 3주, 4주로 설정하여 처리하였으며, 각 처리당 2개의 순환식 재배시스템을 사용하였다. 각 시스템에는 3주의 파프리카를 재배하였다. 매주 각 혼합탱크 내 양액의 pH를 측정하고, 양액 샘플을 채취하여 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻ Cl⁻의 농도를 분석하였다. 양이온은 유도결합플라즈마 발광광도기(ICP-730 ES, Varian, USA)를 사용하였고, 음이온은 이온크로마토그래프(ICS-3000, Dionex, USA)을 사용하여 농도를 분석하였다.

이온의 활동도 및 EC 기여 비율 추정

각 이온이 양액 EC에 기여하는 비율은 이온의 당량과 이동도에 결정된다. 수정재배와 같이 낮은 양액 농도 조건에서 양액 중의 이온의 당량 이온전도도의 비는 극한 이온 당량전도도의 비와 동일하다고 가정하였다(eq. 1).

$$EC_i = \frac{|z_i|T_i\lambda_i}{\sum |z|T\lambda} \approx \frac{|z_i|T_i\lambda_{i0}}{\sum |z|T\lambda_{0}} \quad (\text{eq. 1})$$

단, EC_i: 이온의 EC 기여 비율, T_i: 이온활동도, λ_i: 당량이온전도도, λ₀₀: 극한당량이온전도도, i: 임의 이온을 나타낸다. 보다 세밀하게 분석하기 위하여 EC에 기여하는 농도는 이온페어를 제외한 이온 활동도(activity)를 사용하였고, 용액내의 화학적 평형상태에서 수치해석을 이용하여 이온 활동도를 구하였다(Adams, 1977). 이 때 사용된 이온의 반경 및 극한 이온당량전도도는 Table 1과 같다. 화학평형상태는, A_i의 초기치에 C_i를 대입해서 양액의 이온강도(I)를 구한 후 (eq. 2), Debye-Hückel의 식으로부터 활동도계수(r_i)를 구하였다(eq. 3). 각 이온의 활동도(T_i)는 이온의 몰농도와 활동도계수의 곱이다(eq. 4). 각 이온의 활동도와 평형정수(K_{ij})를 이용해서 이온페어를 구한 후에 A_i를 구하였다(eq. 5). 이러한 과정을 평형상태에 도달할 때까지 반복하였고, Cl⁻ 및 NO₃⁻은 양이온과 이온페어를 이루지 않고, PO₄³⁻는 H₂PO₄⁴⁻의 형태로 존재한다고 가정하였다.

$$I = \frac{1}{2} \sum (A_i \cdot z_i^2) \quad (\text{eq. 2})$$

$$-\log r_i = \frac{Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + Ba_i \sqrt{I}} \quad (\text{eq. 3})$$

$$T_i = r_i A_i \quad (\text{eq. 4})$$

$$A_i = C_i - \sum \frac{T_i T_j}{K_{ij}} \quad (\text{eq. 5})$$

단, z_i: 이온의 전하, I: 이온강도, A 및 B: 0.509 및 0.329 (1기압, 25°C), a_i: 유효이온반경(Å), A_i: 화학평형상태의 최종 이온의 몰농도, r: 활동도계수, T_i: 이온의 활동도(mole/L), C_i: 몰농도 측정치, K_{ij}: 평형정수. 여기서, i는 임의 이온, j는 i와 반대극성을 가진 각 이온을 의미한다.

결과 및 고찰

양액 교체 주기에 따른 EC 및 이온 농도 변화

본 순환식 수정재배시스템의 혼합탱크 내 양액의 EC는 각 처리에 무관하게 2.6-2.7dS·m⁻¹에서 적정하게 조절되었다(Fig. 2). 배액의 EC는 혼합 탱크 내의 양액의 EC보다 높기 때문에 배액이 유입되면 혼합탱크 내 양액의 EC가 상승하고, 제어 순서에 따라서 새로운 양액과 원수를 투입하여

Table 1. Effective ion radius and limit equivalent ionic conductivity.

	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	Na ⁺	Cl ⁻
Ion radius (Å)	3.0	6.0	8.0	2.5	3.0	4.0	4.5	4.5	3.0
Limit equivalent ionic conductivity (Ω·cm ² ·mol ⁻¹)	73.5	59.5	53.5	73.55	71.46	80.02	36.0	50.1	76.4

급액하기 전의 혼합탱크 내의 양액 EC를 일정하게 조절하였다.

각 처리구의 혼합탱크 내 개별 이온의 당량 농도는 시간 경과에 따라 변화하였다(Fig. 3). 본 실험에서 4주간의 처리 내에서는 교체 주기에 따른 개별 이온의 농도 변화는 처리구 별로 차이를 보이지 않았다. K^+ 의 경우 초기 양액의 농도는 $7\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 였으며, 전체 처리구의 농도 변화는 약 $5\text{-}8\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 에서 유지되었다. Ca^{2+} 는 초기 농도가 $12\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 였으며, 약 $11\text{-}14\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 사이에서 농도가 변화하였다. Mg^{2+} 와 Na^+ 는 상대적으로 농도 변화 폭이 좁았으며, 초기 농도가 각각 2, $0.5\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 에서 각각 2.0-2.7, $0.5\text{-}0.6\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 사이에서 유지되었다. 음이온에서는 NO_3^- 와 SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Cl^- 는 각각의 초기 농도가 19, 4, 4, 0.3으로 시작하여 14-19, 4-5, 1-4, 0.3-0.5 $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 범위에서 분포하였다. 교체 주기에 따른 혼합 탱크내의 양액 중 이온 농도 차이가 크게 나타나지 않은 것은, 작물의 양분 흡수 이외의 다른 요인의 영향도 있었을 것이라고 판단된다. 배액율은 배액의 EC에 영향을 주게 되며 (Ahn et al., 2010; Corwin et al., 2007), 이러한 배액을 재사용할 경우는 혼합탱크 내 양액의 농도 및 각 이온의 농도에 영향을 주게 된다. 특히 EC 기준 순환식 수경재배에서 배액의 부피와 농도는 원수의 희석 비율과 새로운 양액의 투입 비율을 결정하는 중요한 요소이기 때문에(Savvas and Mamos, 1999), 추후 이와 관련된 분석이 필요하다. 일정 기간의 순환식 수경재배에서 비순환식에 비해 생육이나 수량에서 유의적 차이가 나타나지 않는 것은(Ehret et al., 2005; Raviv et al., 1998), 순환식 수경재배에서 양분의 불균형이 나타나

기까지는 일정 기간이 필요함을 의미한다. 본 실험에서 1주간격 교체 처리구와 4주간격 교체 처리구 사이에서 큰 차이가 보이지 않는 것은 4주간의 순환에서는 배액 재사용에 따른 양액 중의 이온 농도 변화가 상대적으로 작았기 때문인 것으로 판단된다. 또한 본 실험에서는 초기 생육단계의 파프리카를 사용하였기 때문에 상대적으로 이온 변화가 작게 나타난 것으로 판단된다.

양액 교체 주기에 따른 이온 균형 변화

양액의 재사용에 따른 이온의 불균형을 파악하기 위해 이온 간의 비율 변화를 조사하였다(Fig. 4). 양이온에서는 $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$ 와 음이온에서는 $NO_3^- : PO_4^{3-} : SO_4^{2-}$ 의 비율 변화를 파악하였다. 양이온의 초기 양액 내 비율은 $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$ 가 0.31 : 0.51 : 0.18 이었으며, 처리 기간이 경과함에 따라 비율이 변화하였다. 각 처리구의 비율 변화 또한 처리구 별 차이가 크게 나타나지 않았지만, 전체 처리구의 비율 변화는 Ca^{2+} 와 K^+ 를 중심으로 분포하였다. 음이온의 초기 양액 내 비율은 $NO_3^- : PO_4^{3-} : SO_4^{2-}$ 가 0.70 : 0.14 : 0.16로 조성되었고, 음이온의 비율 변화 또한 각 처리구별 차이가 크게 나타나지 않았으며 전체 처리구에서 SO_4^{2-} 와 PO_4^{3-} 의 비율 변화를 중심으로 분포하였다. Marti and Mills (1991)의 파프리카 생육단계별 양분 흡수량을 조사한 실험에서는 K^+ 의 흡수량이 비교적 높게 나타났고 Ca^{2+} 는 생육단계에 따른 흡수량 변화폭이 컸으며, Mg^{2+} 는 흡수하는 비율이 상대적으로 낮게 나타났다. 본 실험에서 양이온의 비율 변화에서 K^+ 와 Ca^{2+} 의 변화를 중심으로 나타난 것은 파프리카의 양분 흡수 패턴에서 기인한 것으로 판단된다.

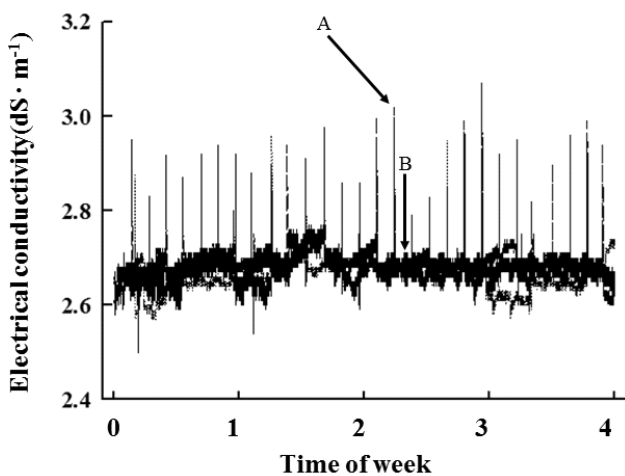


Fig. 2. Change in EC of nutrient solution in the mixing tank of each treatment (—— 1-week, ---- 2-week, 3-week, and - · - · - 4-week renewal intervals. A and B indicate the ECs just after mixed with drainage of high EC and after adjusted with water and fresh nutrient solution for supply, respectively).

각 이온의 활동도 계수 변화 및 EC 기여도 추정

EC 2.6dS/m를 유지하면서 양액 중의 K^+ , NO_3^- , $H_2PO_4^-$ 등의 1가 이온과 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} 등의 2가 이온의 활동도 계수는 각각 0.8-0.9, 0.5 - 0.6사이에서 변화였고, 시간 경과와 함께 각 이온의 활동도 계수는 일정한 경향을 유지하였다(Fig. 5). 1가와 2가의 활동도계수의 차이는 각 이온의 이온 강도와 각 이온의 유효 이온반경의 영향에 의한 것으로 2가 이온은 유효이온 반경이 크기 때문에(Table 1) 실질적인 이온의 활동도가 감소하게 된다(Adams, 1977). 따라서 양액 중에 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} 의 2가 이온이 많이 잔류할 경우, 이온 강도가 증가하고 이에 따른 활동도가 감소되어 자유로운 이온 형태가 감소하게 된다. 이러한 방법 이외에도 다양한 방법으로 이온 활동도 계수를 추정하는 모델이 제시되고 있다(Pazuki and Rohhani, 2006).

각 이온이 양액의 EC에 기여한 비율은 K^+ 와 NO_3^- 가 가장

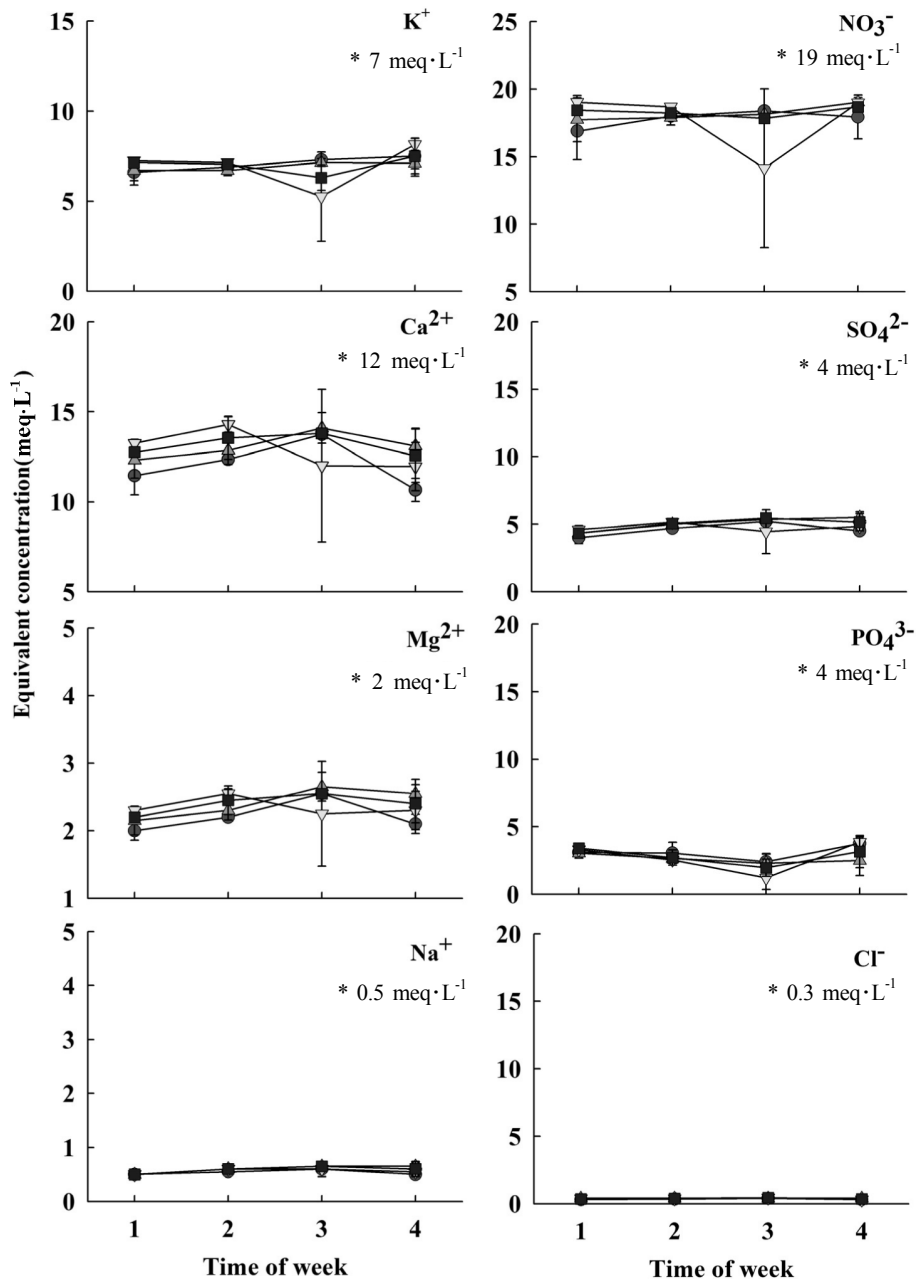


Fig. 3. Change in individual ion equivalent concentrations of the circulated nutrient solution under EC-based nutrient control in closed-loop soilless culture for sweet pepper plants (● 1- week, ▲ 2- week, ▼ 3- week, and ■ 4- week renewal intervals. Asterisked numbers means initial ion equivalent concentration before the circulation started).

켰고, 다음으로 Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} 순으로 나타났다(Fig. 6). 이것은 초기 양액의 조성에서 K^+ , NO_3^- , Ca^{2+} 등의 비율이 높았기 때문이지만, Ca^{2+} 의 경우는 높은 비율임에도 불구하고 2가 이온은 이온 자체의 극한 당량이온전도도가 상대적으로 낮고, 활동도계수도 낮기 때문에 EC에 기여하는 비율이 낮게 나타났다. 실제로 일정성분의 양액 공급에 의한 EC 제어를 실시할 경우, 1가 이온의 흡수와 2가 이온의 잔류가 계속되면, 저농도의 1가 이온이라도 EC기여도가 높게 되며, 고농도의 2가 이온이라도 EC 기여도가 낮게 평가될 수 있다

(Son, 1998). 따라서 양액 중의 이온 성분의 변화에 무관하게 공급되는 양액 성분에 의하여 1가 이온의 감소와 2가 이온의 증가를 수반한 이온성분의 불균형을 가속시킬 수 있다.

재사용 양액의 이온 농도에 영향을 주는 요인은 식물의 양분흡수가 1차적이다. 본 실험에서 4주간의 순환식 수경재배 처리에서는 양액 교체에 따른 이온 농도, 균형, EC 기여도의 차이가 나타나지 않았다. 이는 초기 생육단계 파프리카의 순환식 수경재배에서 4주 동안의 작물 양분 흡수가 재사용 양액 성분에 미치는 영향이 비교적 작거나, 배액율의

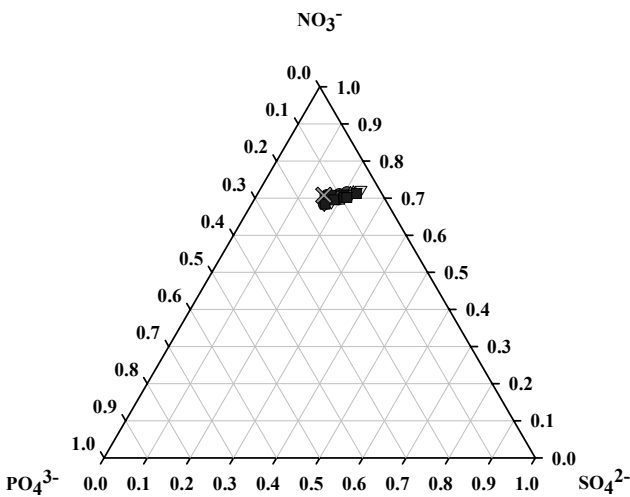
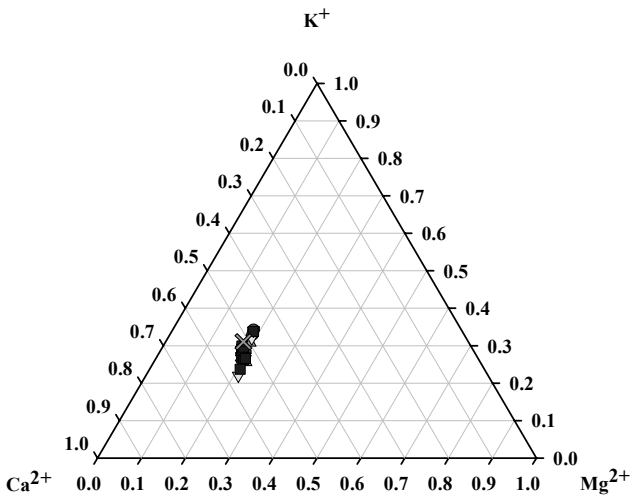


Fig. 4. Change in cation (top) and anion (bottom) balances in the circulated nutrient solution under EC-based nutrient control in closed-loop soilless culture for sweet pepper plants at different renewal intervals (\times initial ratio, \bullet 1- week, \blacktriangle 2- week, \blacktriangledown 3- week, and \blacksquare 4- week renewal intervals).

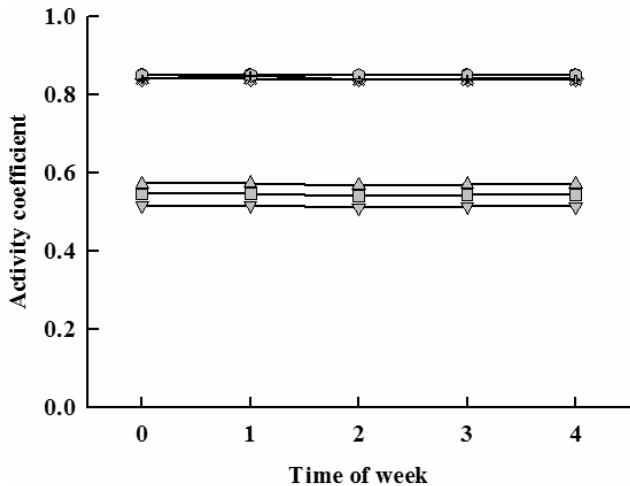


Fig. 5. Change in individual activity coefficients of ions in the circulated nutrient solution (\blacklozenge K^+ , \blacksquare Ca^{2+} , \blacktriangle Mg^{2+} , \times NO_3^- , \blacktriangledown SO_4^{2-} , \bullet $H_2PO_4^-$, and $+$ Cl^-).

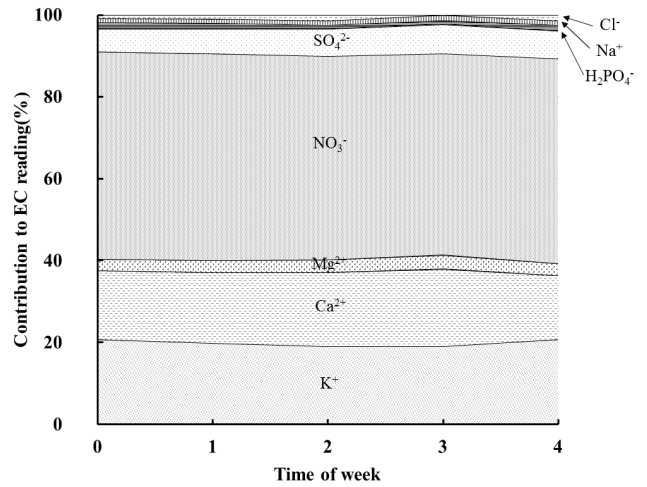


Fig. 6. Change in individual ionic contributions to EC reading in the circulated nutrient solution.

영향을 받았을 것으로 판단된다. 따라서 초기 생육단계의 파프리카를 EC 기준 순환식으로 수경재배를 할 경우 4주 이내의 재배 기간에서는 이온 농도 변화와 이에 따른 EC 기여도의 변화로 인한 측정값의 왜곡은 적을 것으로 판단된다. 본 실험에서는 초기 생육단계의 파프리카를 사용하였기 때문에 이온 변화가 작게 나타났으며, 전 생육단계로 확대할 경우에는 이온변화의 폭이 보다 커질 것으로 판단된다.

초 록

EC 기준의 순환식 수경재배시스템에서 재사용 양액 내의 이온 농도의 변화와 각 이온의 EC 기여 비율의 변화는 안정적인 양액 관리를 위해서 고려되어야 할 중요한 요인이다. 본 연구는 초기 생육단계 파프리카의 EC 기준 순환식 수경재배에서 교체 주기에 따른 재사용 양액 내 이온 농도, 이온 균형 및 이온의 EC 기여도의 변화를 조사하여 재사용 양액의 적정 분석 주기를 규명하고자 수행하였다. 실험은 파프리카의 평균 마디수가 13마디일 때 시작하였고, 처리 종료 시점에서는 평균 마디수가 18마디였다. 1개의 암면 슬라브 당 3주의 파프리카가 재배되었다. 처리는 재사용 양액의 교체 주기에 따라 각각 1주, 2주, 3주, 4주 교체 처리구로 구성되었다. 양액은 일사비례제어방식으로 급액되었다. 배액은 배액 탱크에 수집된 후에 당일 관수가 종료된 후 혼합 탱크에서 EC $2.69dS \cdot m^{-1}$ 가 될 때까지 희석되었다. 혼합된 양액은 익일의 양액으로 사용되었다. 재사용 양액은 주기적으로 수집하여 분석되었다.

교체 주기에 따른 이온 농도의 변화는 처리별 차이가 나타나지 않았다. 모든 처리구에서 이온 농도의 변화 범위는 각각 K^+ 5-8, Ca^{2+} 11-14, Mg^{2+} 2.0-2.7, Na^+ 0.5-0.6, NO_3^-

14-19, SO_4^{2-} 4-5, PO_4^{3-} 1-4, Cl^- 0.3-0.5 $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 와 같았다. 교체 주기에 따른 이온 균형 변화는 크지 않았다. 그러나 전체 처리구에서 이온 비율의 변화는 일정한 경향을 나타냈다. 양이온 비율 변화는 $\text{K}^+ : \text{Ca}^{2+}$ 을 중심으로 나타났으며, 음이온은 $\text{SO}_4^{2-} : \text{PO}_4^{3-}$ 를 중심으로 나타났다. 양액 중의 K^+ , NO_3^- , H_2PO_4^- 의 1가 이온과 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} 의 2가 이온의 활동도 계수는 각각 0.8-0.9, 0.5-0.6 사이에서 변하였고, 시간 경과와 함께 각 이온의 활동도 계수는 일정한 경향을 나타냈다. 각 이온이 양액의 EC에 기여한 비율은 K^+ 와 NO_3^- 가 가장 컸고, 다음으로 Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} 순으로 나타났다. 본 실험에 적용한 교체 주기 4주는 초기 생육단계의 파프리카를 EC 기준 순환식으로 수정재배 할 경우, 이온 농도 변화와 이에 따른 EC 기여도의 변화는 안정적인 범위 이내라고 판단된다.

추가 주요어 : 활동도 계수, 당량이온전도도, 이온농도, 암면 재배

인용문헌

- Adams, F. 1977. Ionic concentration and activity in soil solution. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35:420-426.
- Ahn, T.I., J.W. Shin, and J.E. Son. 2010. Analyses 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'). J. Bio-Env. Con. 19:298-304.
- 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.
- Ehret, D.L., J.G. Menzies, and T. Helmer. 2005. Production and quality of greenhouse roses in recirculating nutrient systems. Sci. Hort. 106:103-113.
- 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.
- Gutierrez, M., S. Alegret, R. Caceres, J. Casadesus, O. Marfa, and M. Del Valle. 2008. Nutrient solution monitoring in greenhouse cultivation employing a potentiometric electronic tongue. J. Agr. Food Chem. 56:1810-1817.
- 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.
- Pazuki, G.R and R.R. Rohhani. 2006. A new model for the activity coefficients of individual ions in aqueous electrolyte solutions. Fluid Phase Equilibria 242:65-71.
- 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.
- Savvas, D. 2002. Automated replenishment of recycled greenhouse effluents with individual nutrients in hydroponics by means of two alternative models. Biosyst. Eng. 83:225-236.
- 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.
- Savvas, D. and G. Manos. 1999. Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems. J. Agr. Eng. Res. 73:29-33.
- Son, J.E. 1998. Precise control of nutrient solution and analysis of ionic contribution to EC reading. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 16:362-354.
- 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. Am. Soc. Hortic. Sci. 121:1082-1088.