

적산 일사 제어법으로 관수하는 순환식 수경재배에서 배액 혼합 방식에 의한 재사용 양액 내 양분 조정효과 비교

안태인 · 신종화 · 노은희 · 손정익*
서울대학교 식물생산과학부 및 농업생명과학연구원

Comparison of Nutrient Replenishing Effect under Different Mixing Methods in a Closed-loop Soilless Culture using Solar Radiation-based Irrigation

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

Abstract. Electrical conductivity, drainage, and irrigation amount of nutrient solution are important factors for determination of the mixing ratio of fresh and reused nutrient solutions in closed-loop soilless culture. Generally a fixed mixing ratio is applied in commercial scale greenhouses using solar radiation-based irrigation system. Although it ensures continuous supply of fresh nutrient solution in the mixing process, occasional discharge of the drainage is inevitably required. This study was conducted to compare the nutrient replenishing effect under different mixing processes and to investigate appropriate mixing process. For this experiment, a fixed mixing ratio (FR), modifiable mixing ratio (MR), and open-loop (OP) as control were applied. Mixing ratio was determined by a set value of EC for dilution of collected drainage in FR and the set values of 1.0 and 2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ were used as treatments (FR 1.0 and FR 2.0), respectively. In MR, mixing ratio was determined based on EC and volume of drainage within irrigation volume per event. The volume of drainage stored in the drainage tank tended to increase in FR 1.0. Although such trend was not observed in FR 2.0 and MR, the volume of drainage stored in MR was lower than that in FR 2.0. The ion balance of $\text{Mg}^{2+} : \text{K}^{+} : \text{Ca}^{2+}$ or $\text{SO}_4^{2-} : \text{NO}_3^{-} : \text{PO}_4^{3-}$ in the drainage and reused nutrient solution changed within a narrow range regardless of treatment.

Key words : closed-loop, EC, ion balance, nutrient solution, rockwool, soilless culture, sweet pepper

서 론

고형배지를 사용하는 수경재배 방식은 식물에게 적합한 양수분을 제공함으로써 생산성 향상에 기여해왔다. 하지만 수경재배 방식은 토경재배에 비해 상대적으로 작은 완충효과로 인해 일정 비율의 배액을 발생시키며, 이는 수경재배에서 양수분 이용효율의 감소와 환경적인 부하의 요인이 된다. 이러한 제한요인을 극복하기 위한 방법으로 발생된 배액을 재사용하는 순환식

수경재배 방식이 있다.

순환식 수경재배의 적용 시 식물의 양분 흡수로 재사용 양액 내 이온의 농도 변화와 이로 인한 식물의 생육이 감소되는 현상이 보고된 바 있다(Ehret 등, 2005; Hao와 Papadopoulos, 2002; Zekki 등, 1996). 이를 극복하기 위하여 순환식 수경재배에서 재사용 양액 내 이온 농도 간의 불균형을 최소화하기 위한 연구가 수행되어 왔으며, 전기전도도(EC)를 측정하여 전체 이온의 농도를 조절하는 방식과 이온 센서를 이용하여 개별 이온을 실시간으로 측정하여 양액 내 양분 농도 조절에 반영하는 방식을 이용한 연구로 구분할 수 있다. 식물의 양분 흡수는 환경조건과 생육단계에

*Corresponding author: sjeenv@snu.ac.kr
Received December 8, 2011; Revised December 20, 2011;
Accepted December 23, 2011

따라 변하기 때문에(Le Bot 등, 1998), 수경재배에서 개별 이온의 농도를 실시간으로 측정할 경우 이온 농도의 변화에 빠른 대응이 가능한 장점이 있다. 수경재배에 이온 센서의 이용은 Darder 등(2009)과 Gutierrez 등(2008) 외 여러 연구자들에 의해 연구가 수행되어 왔다. 하지만 이온센서를 이용하여 개별 이온 농도를 동시에 측정하는 방식은 아직 실용화를 위한 추가적인 연구가 필요한 단계에 있다(Bratov 등, 2010).

순환식 수경재배 조건에서 재사용 양액의 EC를 기준으로 양액을 관리하는 방식은 실용적인 측면에서 유리하다. 반면, 개별 이온 농도의 변화를 알 수 없기 때문에 주기적인 분석을 필요로 한다. 하지만, EC 기준 순환식 수경재배에서는 배액과 원수 그리고 새 양액과의 혼합을 통해 이온 농도 간의 불균형 발생을 최소화 하는 방식을 이용할 수 있으며, 세 가지 혼합 요소의 혼합 비율은 발생된 배액의 부피와 EC 그리고 관수량을 통해 결정할 수 있다(Savvas와 Manos, 1999). 하지만 상업적으로는 고정된 혼합비를 이용하여 배액과의 혼합을 자동화 하는 방식이 많이 이용되고 있다(Savvas, 2002). 이 방식은 고정된 투입비율로 인해서 매번 관수가 진행될 때마다 새 양액의 고정적인 투입으로 인한 양분의 교정효과가 있을 것으로 기대되지만, 배액의 부피·EC와는 무관하게 혼합비가 결정되므로 때때로 배액의 강제 방류가 요구된다. 반면, 배액의 부피와 EC 그리고 관수량을 통해 혼합비를 결정하는 방식은 관수량의 범위 내에서 혼합비를 결정하기 때문에 배액의 강제 방류 가능성은 최소화되지만 새 양액의 투입비는 일정하지 않다. 특히 적산 일사 제어법으로 관수하는 수경재배 조건에서는 일일 공급량의 예측이 어렵기 때문에 일일단위 혼합과정의 적용 시 곤란한 측면이 있다. 순환식 수경재배를 통해 양수분 이용 효율을 극대화하기 위해서는 배액을 전량 사용하는 방식이 바람직하나, 아직 이 두 혼합 방식의 재사용 양액 내 이온 농도 조정 효과는 실험적으로 충분히 고찰되지 않았다.

따라서, 적산 일사량 제어법으로 관수하는 수경재배 조건에서 배액의 재사용을 통해 양수분 이용효율을 극대화하기 위해서는 양분의 교정 효과를 유지하면서도 배액을 전량 이용하는 혼합 방식을 고려할 필요가 있다. 본 연구는 적산 일사량 제어법으로 관수하는 수경재배 조건에서 배액의 혼합 방식에 따른 이온 농도

교정 효과와 배액의 강제 방류 가능성을 비교하여 EC 기준 순환식 수경재배에서 안정적인 재배가 가능하고 양수분의 이용 효율이 높은 혼합방식의 규명에 기여하고자 수행 하였다.

재료 및 방법

1. 순환식 수경재배 모듈 구성 및 양액 혼합비 결정을 위한 변수 규정

실험용 순환식 수경재배 모듈은 배액탱크, 양액 혼합탱크, 관수장치로 구성하였다(Fig. 1). 배액 탱크에서는 수집된 배액의 무게와 EC의 측정이 이루어지며, 혼합탱크에서는 실험의 처리에 맞게 결정된 혼합비율에 따라 혼합이 이루어진다. 배액탱크의 저장 용량은 15L이며 혼합탱크의 용량은 19L로 제작하였다. 배액, 원수, 새 양액의 투입량은 혼합탱크 상단에 설치된 초음파 수위센서의 측정값으로 조정된다. 전반적인 혼합 과정에서 필요한 계측과 제어는 데이터로거(CR1000, Campbell Scientific, USA)와 컨트롤러(SDM-CD16AC, Campbell Scientific, USA)를 이용하였다.

배액의 투입비율을 고정된 처리구(FR)에서 혼합에 필요한 변수는 아래의 식으로 규정하였다.

$$R_{Mx} = V_{Di}/V_{Dr} \quad (1)$$

$$V_{Di} = ((EC_{Dr} \times V_{Dr})/EC_{Di}) - V_{Dr} \quad (2)$$

식(1)과 (2)에서, R_{Mx} 는 배액과 원수의 혼합비율, V_{Di} 는 배액을 희석하는데 필요한 원수량, V_{Dr} 는 배액의 부피, EC_{Dr} 은 배액의 EC, EC_{Di} 는 배액의 목표 희석 EC를 의미한다. 본 처리구에서는 EC_{Di} 를 고정하여

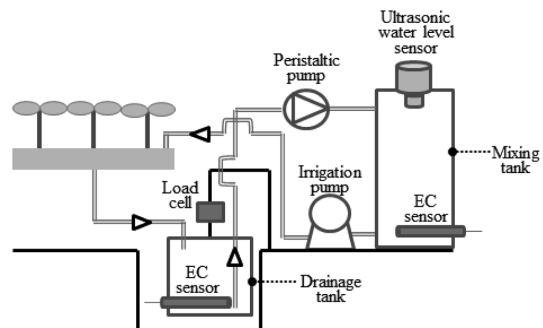


Fig. 1. Configuration of a module for mixing fresh and drained nutrient solutions in closed-loop soilless culture.

적산 일사 제어법으로 관수하는 순환식 수경재배에서 배액 혼합 방식에 의한 재사용 양액 내 양분 조정

항상 일정한 비율로 배액과 원수 그리고 새 양액이 혼합되도록 처리하였다.

배액의 투입 비율을 배액의 EC, 부피, 공급량에 의해 결정한 처리구(MR)에서 혼합에 필요한 변수는 아래와 같은 식으로 규정하였다.

$$V_{Mx} = V_{Ir} - (V_{Dr} + V_{Di}) \quad (3)$$

식(3)의 V_{Mx} 는 배액과 새 양액의 혼합, V_{Ir} 은 관수량, V_{Dr} 은 배액량을 의미한다. 식(3)에서의 V_{Di} 는 공급 양액의 목표 EC로 설정하였다. 본 처리에서는 V_{Ir} 을 고정하고 V_{Dr} 의 변화에 따라 V_{Mx} 를 산출하게 된다. 적산 일사량 제어법으로 관수하는 조건에서는 V_{Ir} 을 일일단위로 예측하기 곤란하기 때문에 1회 관수량으로 설정하여 관수시마다 혼합 비율을 계산하도록 설정하였다. V_{Mx} 값이 음수로 계산될 경우에는 새 양액의 투입은 발생하지 않고 배액의 희석만이 진행된다.

2. 작물재배 환경조건 및 배액 혼합 처리

실험은 서울대학교 부속농장의 연구용 유리온실에서 수행하였으며 파프리카(*Capsicum annum* L. cv 'Fiesta')를 공시작물로 이용하였다. 파프리카는 2011년 1월 18일에 정식하여 비순환식 수경재배로 재배하다가 2011년 9월 25일에서 2011년 9월 28일까지 순환식 수경재배의 배액 혼합방식 처리를 적용하였다. 배지는 암면(Cultilene, Denmark)을 사용하였으며 암면 슬라브 당 3주의 식물을 재배하였다. 재식밀도는 2.8주/m²로 설정하였다. 관수 방식은 적산 일사 제어법을 적용하였으며, 누적광량이 100J·cm⁻²에 도달하였을 때 작물 1주당 양액 150mL가 공급되도록 설정하였다. 실험 기간 동안의 일일 평균 누적광량은 451J/cm²/day 이었으며, 온실 내 온도는 최고 36°C에서 최저 15°C 사이에서 유지되었다.

배액 혼합에서 EC_{Di}를 각각 1.0과 2.0dS·m⁻¹로 설정한 처리구(FR 1.0과 FR 2.0) 와 혼합탱크에서 1회 관수 시 공급되는 양액의 부피를 V_{Ir} 로 고정된 처리구(MR)를 설치하였다. 대조구로는 비순환식 수경재배 방식(OP)을 설정하였다. 모든 처리의 공급 양액의 EC는 2.6dS·m⁻¹였다. 각 처리 당 총 9주의 파프리카를 재식하였다. 실험 기간 동안 각각의 처리구로부터 배액과 혼합탱크 내 양액을 채취하여 분석에 이용하였고 양이온은 유도결합플라즈마 발광광도기(ICP-730 ES,

Varian, USA)를, 음이온은 이온크로마토그래프(ICS-3000, Dionex, USA)를 사용하였다. 최초 공급 양액의 조성은 각각 K⁺ 7, Ca²⁺ 12, Mg²⁺ 2, SO₄²⁻ 4, NO₃⁻ 19, PO₄³⁻ 4meq·L⁻¹이었다.

결과 및 고찰

실험 기간 동안 모든 처리의 혼합 탱크 내 양액의 EC는 혼합 처리과정이 종료된 후에는 2.8±0.1dS·m⁻¹

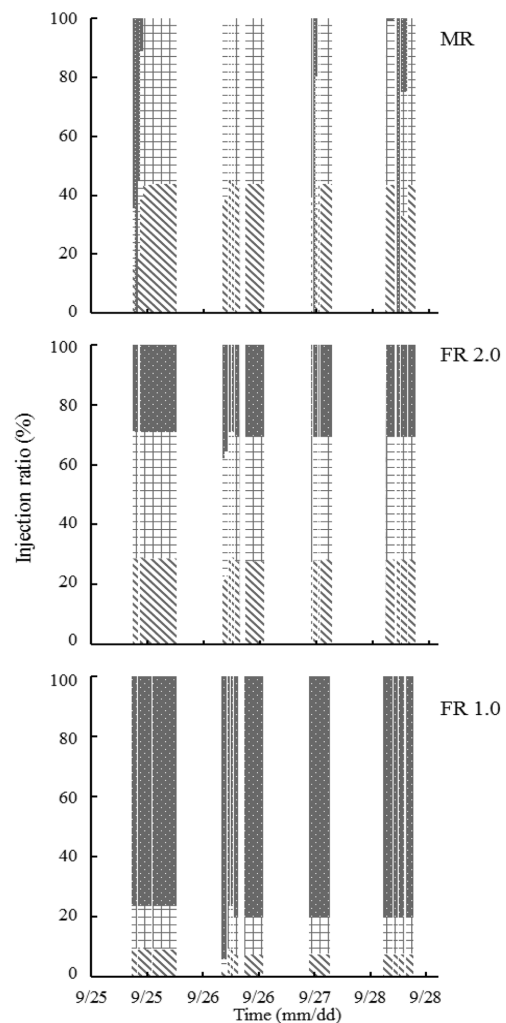


Fig. 2. Injection ratio of fresh nutrient solution (■), tap water (###), and drainage (////) under different mixing methods. MR, modifiable injection ratio; FR 1.0 and 2.0, fixed injection ratios (set ECs of 1.0 and 2.0 dS·m⁻¹ for dilution of drainage, respectively).

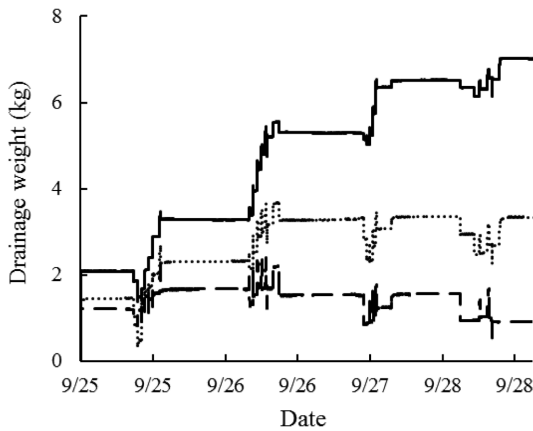


Fig. 3. Changes in weight of stored drainage during the experiment period. MR (dashed line), modifiable injection ratio; FR 1.0 (solid line) and 2.0 (dotted line), fixed injection ratios (set ECs of 1.0 and 2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ for dilution of drainage, respectively).

범위 내에서 유지되었다(data not shown). 배액과 원수, 새 양액의 혼합비율은 FR 1.0, 2.0 처리구의 경우 실험 기간 동안 일정 비율로 혼합이 이루어졌으나, MR 처리구의 경우 관수 시간대의 경과에 따라 변경되었다(Fig. 2). 하지만 MR 처리구에서는 오전에 새 양액의 투입비율이 비교적 높게 나타나는 경향이 관찰되었다. 배액 탱크 내 양액 저장량은 상대적으로 배액의 투입비율이 낮은 FR 1.0 처리구에서 증가되는 경향을 보였으며, 배액 투입비율이 FR 1.0에 비해 높은 FR 2.0 처리구에서는 일정 수준으로 유지되는 경향을 보였고 MR 처리구에서는 FR 2.0 처리구 보다 낮은 수준에서 배액 저장량이 유지되었다(Fig. 3).

FR 1.0 처리구의 배액 저장량의 변화 추세를 약 4ha 규모의 농가가 100t 규모의 배액 탱크를 사용한다고 가정했을 때 약 1주일 정도면 강제 방류 여부를 결정해야 하는 구간에 진입하게 된다. 이는 식물이 양분을 흡수하는 농도는 환경 조건과 생육 단계에 따라 변하게 되는데(Noordwijk, 1990), 이에 비해 고정된 배액비율을 적용할 경우 투입된 새 양액의 양이 식물의 양수분의 흡수로 인해 감소한 양액의 양을 초과하였기 때문에 발생된 현상이다. FR 2.0 처리구의 경우는 배액의 투입 비율은 비교적 크지만, 양수분의 흡수로 인해 감소한 양액의 범위 내에서 새 양액을 투입했기 때문에 누적 현상이 뚜렷하지 않았던 것으로 판단된다. MR 처리구에서는 관수 시간대가 변함에 따라

배액의 투입비율이 변화했는데 이는 혼합비의 결정이 V_{ir} 을 기준으로 결정되기 때문에 배액의 투입비율이 다른 처리구에 비해 상대적으로 높았기 때문이다. 반면 MR 처리구에서 새 양액의 투입 비율은 오전 시간대에 많이 증가되거나 배액 탱크 내 수위가 최저 수위까지 감소하여 배액과의 혼합 없이 새 양액만 공급되는 현상이 관찰되었다.

Tai 등(2010)은 암면 배지를 이용한 파프리카 수경 재배에서 적산 일사 제어방식으로 관수 할 경우, 전날 야간의 수분 감소량을 채우고 포장 용수량에 도달하였을 때 첫 배액이 발생한다고 하였다. 본 실험의 MR 처리구에서 오전 시간대의 새 양액 투입 비율이 높은 경향이 나타난 것은 적산 일사량 제어방식의 급배액 특성 때문인 것으로 판단된다. MR 처리구에서 새 양액만 단독으로 투입될 경우 첫 배액이 발생할 때까지 새 양액이 투입된다. 배액 내 이온 간 비율 변화는 배액율의 영향을 받기 때문에(Ahn 등, 2010), 본 실험에서와 같은 현상을 정량화 하여 첫 배액을 새 양액으로 발생시킬 수 있다면 재사용 양액 내 이온 간 균형 유지에 긍정적인 기능을 할 것으로 기대된다.

처리구에 따른 배액 내 $\text{Mg}^{2+}:\text{K}^+:\text{Ca}^{2+}$ 와 $\text{SO}_4^{2-}:\text{NO}_3^-:\text{PO}_4^{3-}$ 의 당량 농도 간 비율변화를 비교하고자 삼

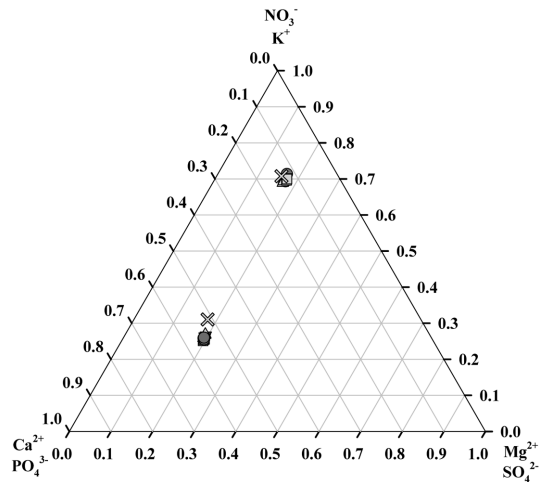


Fig. 4. Changes in cation (bottom group) and anion (upper group) ratio of drainage under different mixing methods (× initial ratio, ▲ OP, ● FR 1.0, ■ FR 2.0, and ▼ MR). OP, open; FR 1.0 and 2.0, fixed injection ratios (set ECs of 1.0 and 2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ for dilution of drainage, respectively); MR, modifiable injection ratio.

적산 일사 제어법으로 관수하는 순환식 수경재배에서 배액 혼합 방식에 의한 재사용 양액 내 양분 조정

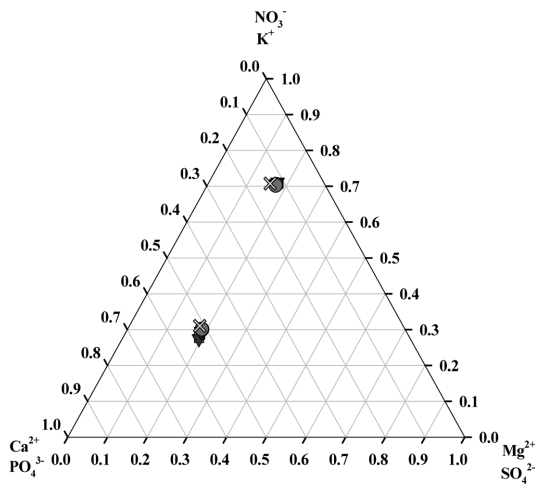


Fig. 5. Changes in cation (bottom group) and anion (upper group) ratio of reused nutrient solution under different mixing methods (\times initial ratio, \blacktriangle OP, \bullet FR 1.0, \blacksquare FR 2.0, and \blacktriangledown MR). OP, open; FR 1.0 and 2.0, fixed injection ratios (set ECs of 1.0 and 2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ for dilution of drainage, respectively); MR, modifiable injection ratio.

각도를 이용하였다(Fig. 4). 배액 내 이온 간 비율 변화는 네 처리구 모두 유사한 범위 내에서 유지되었으며, 음이온은 초기 비율과도 유사한 범위 내에서 유지되었다. 하지만 양이온의 경우 초기 이온 농도의 비율에서 이탈되었다. 혼합 탱크 내 재사용 양액의 이온 농도 간 비율 변화는 음이온의 경우 초기 비율과 유사한 범위 내에서 유지되었으나, 양이온의 경우 혼합과정을 거친 후 초기 비율에 근접하게 변화하였다(Fig. 5). 모든 처리에서 재사용 양액 내 이온 간의 비율이 초기 비율을 중심으로 비교적 좁은 내에서 변화한 것은 혼합에 이용한 배액 내 이온 간 비율 변화가 크지 않았기 때문으로 판단된다. 토마토를 암면 순환식 수경재배 방식으로 재배한 Zekki 등(1996)의 실험에서는 식물의 양분 흡수로 인해 재사용 양액 내 나타나는 이온 간 균형 변화는 양이온의 경우 실험 기간 동안 표준 범위 내에서 유지되었으나, SO_4^{2-} 와 K^+ 의 비율은 0.82와 1.66 사이에서 점진적으로 변화되는 경향이 관찰되었다.

본 실험에서 대조구인 OP의 경우 배액 내 이온 간 비율 변화는 초기 비율과 비교적 근접하게 유지되었다. 이는 본 실험 기간 동안 파프리카의 흡수로 인해 발생한 배액 내 이온 비율 간 변화의 영향이 비교적 작

았던 것으로 판단된다. 하지만 이러한 영향은 수경재배에 적용한 근권부의 부피에 따라 그 정도가 변할 수 있기 때문에(Zekki 등, 1996), 배액의 재사용 시 근권부의 부피에 따라 그 영향을 고려할 필요가 있다. 일정 기간 동안의 배액의 재사용은 비순환식과 비교해서 식물의 생육이 유의적으로 감소하지 않는 경우도 있다(Ehret 등, 2005; Hao와 Papadopoulos, 2002; Raviv 등, 1998). 이는 Steiner(1980)의 연구에서 보고된 일정 구간 안에서의 이온 간 비율 변화는 식물 자체의 선택성에 의해 생육에 유의한 영향이 관찰되지 않는 현상도 원인 중 하나로 생각되며, 작물 자체의 특성도 적절한 혼합 방식의 결정 및 재사용 양액의 분석 주기 설정에 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 실험에서 혼합 처리에 따른 이온 간 비율 변화의 차이가 관찰되지 않았던 것은 파프리카의 양분 흡수로 인해 발생한 배액 내의 이온 농도의 변화가 단기간의 배액 재사용을 통해서는 나타나지 않았기 때문으로 생각된다. 따라서 적산 일사량 제어법으로 관수하는 수경재배 시스템 내에서 식물의 흡수로 인해 발생한 배액 내 이온 농도의 변화가 미치는 영향이 상대적으로 작은 범위에서 나타날 경우 배액의 EC와 부피에 따라 혼합비를 변경하여 양수분의 이용효율을 증가시키는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 하지만 본 실험에서는 단기적인 처리를 적용하였기 때문에 식물의 생육단계 변화를 포함한 장기적인 배액의 재사용에 대한 영향에 대한 평가를 위해서는 추가적인 실험이 필요할 것으로 생각된다.

적 요

순환식 수경재배에서 배액의 EC, 부피, 관수량은 재사용 양액의 혼합비율을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다. 적산 일사량 제어법으로 관수할 경우 일일 관수량의 예측은 곤란하며 일반적으로 고정된 혼합비율을 사용한다. 이 경우 새 양액이 고정적으로 투입되어 양분의 조정 효과가 기대되지만, 때때로 배액의 강제 배출을 필요로 한다. 본 연구는 적산 일사량 제어법으로 관수하는 순환식 수경재배 조건에서 배액의 혼합비를 고정한 처리구(FR)와 정해진 혼합 용량 내에서 배액의 부피와 EC에 따라 혼합비를 변경하는 처리구(MR)의 재사용 양액 내 양분 조정효과를 비교하여 양

수분 이용효율이 높은 혼합방식의 규명에 기여하고자 수행하였다. 배액의 농도 변화를 비교하기 위한 대조구로는 비순환식 수경재배 처리구(OP)를 구성하였다. FR 처리구의 배액 혼합 비율은 배액의 희석 EC를 각각 1.0, 2.0dS·m⁻¹로 설정하여 혼합처리를 적용하였다. MR 처리구의 경우는 혼합 용량을 1회 관수량을 기준으로 배액의 EC와 부피에 따라 혼합비율이 변경되도록 하였다. 배액의 누적 현상은 FR 1.0 처리구에서 관찰되었으며, FR 2.0과 MR 처리구에서는 배액 누적 현상이 나타나지는 않았으나 MR 처리구의 배액 저장량이 FR 2.0 처리구에 비해서 낮게 나타났다. 배액과 재사용 양액 내 Mg²⁺:K⁺:Ca²⁺와 SO₄²⁻:NO₃⁻:PO₄³⁻의 당량 농도 간 비율 변화는 FR, MR 처리구에서 초기비율 대비 비교적 좁은 변화 범위를 나타냈다.

사 사

이 논문은 농림수산식품부(농림수산기술기획평가원)의 연구과제의 일환으로 수행되었음.

인 용 문 헌

- Ahn, T.I., J.H. Shin, and J.E. Son. 2010. 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 annuum* L. 'Fiesta'). *J. Bio-Environment Control* 19: 298-304 (in Korean).
- Bratov, A., N. Abramova, and A. Ipatov. 2010. Recent trends in potentiometric sensor arrays-A review. *Anal. Chim. Acta* 678:149-159.
- Darder, M., A. Valera, E. Nieto, M. Colilla, C.J. Fernandez, R. Romero-Aranda, J. Cuartero, and E. Ruiz-Hitzky. 2009. Multisensor device based on Case-Based Reasoning (CBR) for monitoring nutrient solutions in fertigation. *Sens. Actuator B-Chem.* 135:530-536.
- 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.
- 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.
- Hao, X. and A.P. Papadopoulos. 2002. Growth, photosynthesis and productivity of greenhouse tomato cultivated in open or closed rockwool systems. *Can. J. Plant Sci.* 82:771-780.
- Le Bot, J., S. Adamowicz, and P. Robin. 1998. Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Sci. Hort.* 74:47-82.
- Noordwijk, V.M. 1990. Synchronisation of supply and demand is necessary to increase efficiency of nutrient use in soilless horticulture. *Plant nutrition physiology and applications*, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands.
- 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. Hort. Sci. Biotechnol.* 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. Manos. 1999. Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems. *J. Agr. Eng. Res.* 73:29-33.
- Steiner, A.A. 1980. The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Act. Hort.* 98:87-97.
- Tai, N.H., J.S. Park, T.I. Ahn, J.H. Lee, D.J. Myoung, Y.Y. Cho, and J.E. Son. 2010. Analysis of relationship among growth, environmental factors and transpiration in soilless culture of paprika plants. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 28:59-64 (in Korean).
- 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. Hort. Sci.* 121: 1082-1088.