

N, K, Ca의 한정된 이온센서 이용을 전제로 한 순환식 수경재배에서 P, Mg의 조절 방법

최경이^{1*} · 여경환¹ · 이한철¹ · 이성찬¹ · 이증섭¹ · 강남준^{2*} · 김학진³ · 정대현³

¹국립원예특작과학원 시설원예연구소, ²경상대학교 농업생명과학원, ³서울대학교 생물공학과

Control of Mg and P Ion Concentration as a Precondition to Use N, K and Ca Ion Sensors in Closed Hydroponics

Gyeong Lee Choi^{1*}, Kyung Hwan Yeo¹, Han Cheol Rhee¹, Seong Chan Lee¹, Jung-Sup Lee¹, Nam Jun Kang^{2*}, Hak Jin Kim³, and Dae Hyun Jung³

¹Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Rural Development Administration, Haman 52054, Korea

²Institute of Agric. & Life Sci., Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea

³Biosystems and Biomaterials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

*Corresponding author: k284077@gnu.ac.kr

Abstract

Recycling nutrient solutions in closed hydroponic production systems is usually accompanied by an imbalance of nutrient solutions when concentration is controlled according to electrical conductivity (EC) levels. This study investigated whether it was possible to automatically control the concentrations of five essential elements nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) using only N, K and Ca ion sensors. N, P, K, Ca, and Mg uptake was measured in the nutrient solution, and relationships between absorbed ions were analyzed through twice-repeated experiments in lettuce. Results confirmed that the pattern of PO₄ ion uptake was similar that of N, and the pattern of Mg ion uptake was similar that of Ca. PO₄ ion uptake was most highly correlated with N, and Mg was most highly correlated with Ca. Regression coefficients of N and PO₄ were significantly different at 1.04 and 0.55, respectively, but were similar between Ca and Mg at 0.35 and 0.40, respectively. Additional experiments were conducted to measure nutrient uptake in pak choi and rose plants, both to confirm the results from the first experiment in lettuce, and to assess possible application to other crops. Coefficients of determination both for N and PO₄, and Ca and Mg were considerably high ($R^2 = 0.86$) in cultured pak choi, and similar results were observed in cultured rose ($R^2 = 0.87$ and 0.73 , respectively). Regression coefficients for cultured pak choi were 0.56 and 0.24, respectively, and for rose were 0.51 and 0.16, respectively. Although the results obtained for N and PO₄ were not consistent between the lettuce experiments, N and PO₄ have similar regression coefficients for all crops. No common coefficient was found between Ca and Mg.

 OPEN ACCESS



Korean J. Hortic. Sci. Technol. 34(6):871-877, 2016
<https://doi.org/10.12972/kjhst.20160091>

pISSN : 1226-8763
 eISSN : 2465-8588

Received: March 11, 2016

Revised: July 29, 2016

Accepted: August 2, 2016

Copyright©2016 Korean Society for Horticultural Science.

본 연구는 농촌진흥청 시험연구비(P011385) 지원에 의해 수행되었음.

Additional key words: coefficient of determination, correlation analysis, lettuce, nutrient solution, pak-choi, regression coefficient, rose

서 언

시설재배에 수경재배가 도입된 이래 꾸준한 기술 발전을 이루어 농가의 생산성과 품질 향상을 위해 가장 우선적으로 도입해야 할 중요한 기술이 되었으며, 그 면적도 지속적으로 증가하고 있다. 그런데 농업 선진국인 화란, 일본은 순환식을 도입하여 친환경적인 수경재배의 기반을 마련한 반면에 우리나라는 아직도 배액을 시설 외부로 방출하는 비순환식이 대부분이기 때문인데 배양액으로 인한 토양과 수질오염의 문제가 제기되고 있다.

시설투자비, 배액의 병원균 살균 문제 등이 순환식 수경재배 확산의 주요한 제약요인이지만, 작물 재배적인 측면에서는 배액을 순환시켜 재사용할 때 작물 생육불량을 유발하는 무기이온 간의 불균형 해소 기술 개발이 시급하다. 배액내 무기이온을 직접 제어하는 것이 가장 이상적이지만(Yang et al., 2008) 현실적으로는 배액의 전체 이온농도(EC)를 측정하여 전체 이온의 농도를 목표로 하는 수준으로 희석하는 방법이 주로 이용되고 있다. 그런데 작물의 무기이온 흡수는 기상조건이나 작물의 생장 단계 등 식물체의 자체변수 의해 이온간 흡수비율이 달라지므로(Choi et al., 2008) EC 기준 제어로는 양액내 이온의 균형이 유지되지는 않는(Savvas & Manos, 1999) 문제가 있다. 따라서 주기적인 양액교체(Lee et al., 2005; Ann & Son, 2011), 배액을 조절(Ann et al., 2010), 원수 희석비율(Kwon et al., 2014) 등을 통한 이온 불균형 완화 연구가 이루어졌으나 근본적인 문제를 해결할 수는 없었다.

따라서 순환식 수경재배를 위한 배양액 조절을 위하여 개별적인 농도 측정과 제어 기술의 필요성이 대두되었다. 개별이온 센서에 관한 연구는 ISE(ion selective Electrodes), ISFET(ion-selective field-effect transistors), Optodes(광학센서를 이용하여 흡광도에 따라 이온농도 측정), VISE(virtual ion selective electrode), 전자혀(Potentiometric Electronic Tongue) 등 다양한 시도가 이루어지고 있지만(Gieling et al., 2005; Kim et al., 2006; Gutierrez et al., 2008; Feng et al., 2011) 센서의 정확성과 재현성이 낮고 보정 주기가 짧아 실용적인 적용은 어려운 것이 현실이다(Morard, 1997; Gieling et al., 2005). 그럼에도 이에 대한 연구는 꾸준히 이루어지고 있어 NO₃-N, K, Ca 이온센서는 최근에 상당히 안정적으로 사용할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Morard, 1996; Kim et al., 2006; Feng et al., 2011). 그러나 SO₄와 PO₄는 이온선택성 센서로 측정할 수 없다고 하였고, Mg는 안정된 결과치를 얻을 수 없었다고 하였다(Kim et al., 2006). 미량요소 센서는 현재까지 순환식 수경재배가 다량요소 제어를 전제로 하고 있으므로 연구가 거의 이루어지지 않고 있다.

따라서 비교적 안정적인 NO₃-N, K, Ca는 센서를 이용하여 제어하고 Mg, P이온을 제어하는 방법을 개발한다면 순환식 수경재배에서 배액내 이온 불균형을 해소할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 NO₃-N, K, Ca이온을 센서로 제어한다는 전제하에 센서를 이용할 수 있는 성분과 P, Mg 이온흡수 상관관계를 이용하여 제어할 가능성이 있는지 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

상추 ‘한밭청치마’, (농우바이오)를 이용하여 양분흡수특성을 분석하여 다량원소들의 이온흡수 상관관계를 구명하였다. 2회 시험을 수행하였으며 1차 시험은 2012년 5월 1일부터 5월 21일까지, 2차 시험은 2013년 11월 4일 정식하여 12월 9일 일까지 수행하였다.

또, 엽채류인 청경채 ‘진젠사이’(아시아종묘)와 화훼류인 장미 ‘비탈’(코르데스)로 상관관계식의 적합성을 검증하고 더불어 작목확대 가능성을 검토하였다. 청경채는 2013년 11월 4일 정식하여 12월 9일 일까지, 장미는 2009년 10월 12일 절화지를 일

괄적으로 수확한 후 새로 발생한 절화지가 대부분 수확되는 12월 6일까지 재배하며 결과를 도출하였다.

상추를 재료로 이용한 1, 2차 시험은 240공 암면 플러그에 파종하여 물을 주다가 떡잎이 전개되는 시점부터 한국원예특작과 학원 상추배양액으로 관리하였다. 급액농도는 1차 시험은 $EC\ 1.0dS\cdot m^{-1}$, 2차는 $EC\ 1.3dS\cdot m^{-1}$ 였다. 본엽이 2매 전개된 시점에 소형 담액수경재배기(가화텍, 46x32x22cm)에 정식하였다. 배양액을 15L씩 채웠으며 1주일 간격으로 배액을 교체하며 남은 배양액의 양을 조사하여 양분흡수량을 계산하였다. 초기투입 배양액과 양액교체시 양액을 채취하였는데 1차에는 양액교체시 1회(주 1회), 2차에는 주 2회 샘플을 채취하여 무기이온을(NO_3-N , PO_4 , K, Ca, Mg)을 분석하였는데 분석시 양이온은 ICP(ICAP7400, Thermo Scientific, 미국)로, 음이온은 IC(DX-500, Dionex, 미국)를 이용하였다. 배양액은 N-P-K-Ca-Mg = 9.2-3.6-5.0-3.0-3.6 $me\cdot L^{-1}$ 인 한국원예특작과 학원 상추배양액을 이용하였다. 배양액내 용존산소량을 확보하기 위하여 양액을 9시부터 18시까지는 10분 순환, 50분 정지를 반복하고 야간에는 22시와 4시에 10분씩 1회 순환시켰다.

청경채는 $EC\ 2.5dS\cdot m^{-1}$ 농도로 초기배양액을 공급하였고 상추 2차 시험과 동일한 방법으로 시험을 수행하였다. 배양액은 N-P-K-Ca-Mg = 15.2-3.0-6.8-4.8-2.0 $me\cdot L^{-1}$ 인 배추과 배양액을 이용하였다.

장미는 스티로폼 베드에 배양액을 70L 채운 후 담액수경으로 재배하며 생육초기에는 배양액을 2주 간격으로, 생육후기에는 1주일 간격으로 교체하며 흡수특성을 조사하였다. 배양액은 N-P-K-Ca-Mg = 13.0-3.5-4.5-6.5-2.0 $me\cdot L^{-1}$ 인 일본 아이찌현 장미 배양액을 이용하였다.

통계프로그램(SAS 9.1, SAS Institute Inc., USA)을 이용하여 양분흡수패턴을 상관분석과 회귀분석 하였다.

결과 및 고찰

상추의 급액, 배액(흡수 후 남은 배양액)내 각 이온 분석치와 급액과 배액 양을 조사하였을 때 초기 공급량 대비 각 이온의 흡수비는 Table 1과 같다.

생육 첫 1주일간 무기이온의 흡수량은 매우 적어 이온간의 큰 불균형 없이 초기공급량의 10%이내로 흡수되었고, 2주차에 K 이온의 흡수량이 많아지면서 이온간 흡수불균형이 발생하기 시작하였다. 3주차에는 K, PO_4 , NO_3-N 는 초기 공급량의 50%내외의 흡수율을 나타낸 반면에 Mg와 Ca는 흡수량은 적어 이온간 불균형이 심화되었다. 이와 같은 결과는 Ca와 Mg가 다른 이온에 비하여 상대적으로 적게 흡수되기 때문에 이들 이온이 축적된다고 보고한 Sonneveld(2002)의 결과와 일치하며, 왕성한 생육에 의한 이온간의 불균형 발생하였다는 보고(Choi et al., 2008; Rho et al., 2009)와도 일치한다. 각 이온의 흡수형태를 분석하면 PO_4 는 정식후 14일까지는 NO_3-N 와 흡수비가 거의 일치하였으나, 14일~21일까지 1주일동안 초기투입량 대비 NO_3-N 49%, K는 59%를 흡수하여 K와 비슷한 형태를 나타내었다. Mg는 전생육 기간을 통해 흡수량이 많지는 않아 Ca와 가장 유사한 흡수형태를 나타내었다(Table 1).

NO_3-N , K, Ca 이온센서는 최근에 상당히 안정적으로 사용할 수 있다고 보고되고 있으므로(Kim et al., 2006; Feng et al., 2011; Morard, 1996) 이 이온의 제어는 센서를 이용한다는 전제하에 측정이 불가능한 P, Mg 이온의 조절을 위하여 센서를 이용할 수 있는 것과의 이온흡수 상관관계를 분석하였다. 1, 2차 시험 공통으로 PO_4 는 N와의 상관계수가 가장 높게 나타났고 Mg는 Ca와 가장 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다(Table 2).

Table 1. Uptake ratio of macro-nutrient elements based on initial input for 1 week in lettuce.

Days after planting	NO_3-N	PO_4	K %	Ca	Mg
1~7	9.3	8.7	6.4	6.5	3.4
8~14	17.9	12.2	25.8	6.1	13.3
15~21	49.1	57.4	58.5	16.4	21.7

Table 2. Correlation coefficients between the absorbed ions in lettuce.

Ion	1st			2nd			Combined result		
	NO ₃ -N	K	Ca	NO ₃ -N	K	Ca	NO ₃ -N	K	Ca
PO ₄	0.913	0.852	0.751	0.697	-0.102	0.616	0.874	0.634	0.579
Mg	0.145	0.810	0.859	0.016	-0.076	0.916	0.346	0.150	0.910

위의 결과를 이용하여 회귀분석 한 결과 상추의 경우 1차 시험에서 N과 PO₄의 경우 결정계수가 0.89로 매우 높은 편이지만 양분 흡수량이 적은(생육초기)에 비하여 흡수량이 많아지는 후기는 질소에 비하여 인산의 흡수량이 많아 N-PO₄이온간의 흡수비가 높아지는 경향을 나타내었다(Fig. 1). 2차 반복시험의 결과 N과 PO₄의 결정계수가 0.49로 낮고 회귀계수가 0.55로 1차 시험의 결과와 매우 달랐으며, 생육 후반에 양분흡수비의 증가는 나타나지 않았다(Fig. 2). 1, 2차의 시험 결과를 통합하였을 때 결정계수는 0.74이고, N-PO₄의 회귀계수는 0.87이었다. Ca와 Mg는 1차에서는 회귀계수 0.35이며 결정계수는 0.51로 비교적 낮았으나(Fig. 1) 2차에서는 각각 0.41과 0.79로 결정계수가 높아져 상당히 상관관계를 나타내는 것을 나타냈다(Fig. 2). 1, 2차의 시험 결과를 통합한 결과치는 0.38과 0.71이었다. 이런 일관되지 않은 결과가 도출된 이유는 상추가 다른 작물에 비하여 양분흡수량이 적어서 분석오차가 크게 작용했을 가능성이 있다. 또, Kim과 Kim(2001)의 토마토를 급액농도별 각 생육시기의 양분흡수량에 관한 연구를 분석 해 보면 EC 1.7~2.0dS·m⁻¹ 처리구에서 6월 26일과 7월 3일에 N-PO₄ 흡수비가 평균치 비하여 매우 달랐는데, 본 시험의 결과를 재배시기에 따른 기상환경(1차 실험은 5월, 2차 실험은 11~12월에 수행)과 작물의 생육속도가 복합적으로 작용하였을 가능성도 있어 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

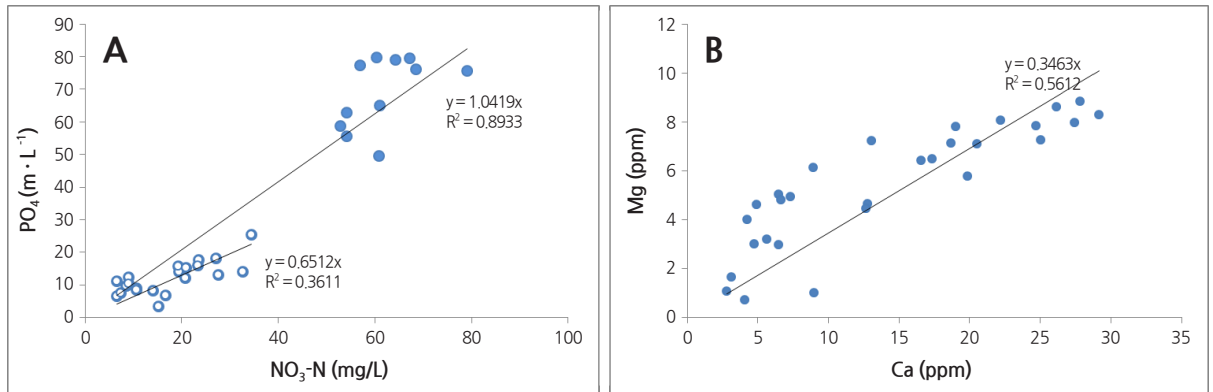


Fig. 1. Correlation between uptake of the ions PO₄ and N (A), and Mg and Ca (B) in the first experiment in lettuce.

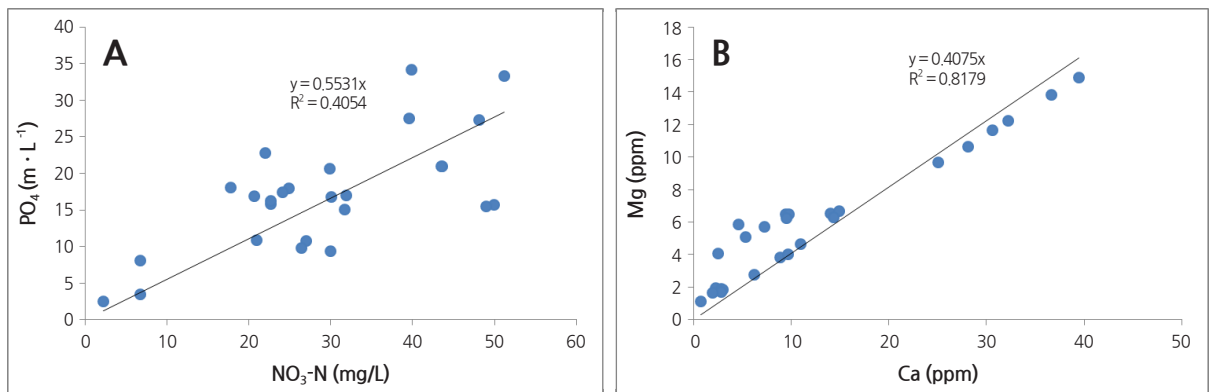


Fig. 2. Correlation between uptake of the ions PO₄ and N (A), and Mg and Ca (B) in the second experiment in lettuce.

상추를 제외한 다른 작물에서 이온간의 흡수 상관관계를 적용하는 것이 적합한지 혹은 동일한 상관 관계식을 적용할 수 있을지를 구명하기 위한 시험의 결과는 다음과 같다.

청경채는 양분의 요구도가 높은 작물로 보고되어 있는데(Choi et al., 2013) 본 연구의 결과에서도 단위 수분흡수량(1L)에 대한 각 이온의 흡수량은 상추보다 많은 것으로 나타났다(Fig 3, 4). N-PO₄, Ca-Mg 각각 회귀계수가 0.56과 0.24로 나타났고 결정계수는 0.86과 0.83으로 나타나 해당 이온간 흡수 상관관계가 매우 높은 것으로 나타났다. 장미는 N-PO₄, Ca-Mg 각각 회귀계수가 0.51과 0.16로 나타났고 결정계수는 0.87과 0.73으로 나타났다(Fig 5).

세 작물을 양분흡수 상관관계를 종합적으로 분석하면, 결정계수는 청경채와 장미가 비교적 높게 나타났으나 상추는 낮은 경향을 나타내었다. N-PO₄ 이온간의 회귀계수는 청경채, 장미가 0.56과 0.51로 매우 유사하였으나, 상추는 이와 다른 결과치를 나타내었으며 반복시험의 결과도 회귀계수의 차이가 크게 나타나 신뢰성이 낮았다. 그러나 1차 실험에서 양분흡수비가 급격하게 증가했던 구간을 제외하면 1, 2차 실험 및 통합치의 회귀계수가 0.65, 0.55, 0.57로 반복 실험에 따른 차이가 감소하고 청경채와 장미와도 매우 유사한 수치를 나타내었다. Ca-Mg 이온의 회귀계수는 상추, 청경채, 장미 각각 0.38, 0.24, 0.16으로 나타나 작물간 유사성은 없는 것으로 판단되었다. Kim et al.(2001)의 토마토 연구결과에 대한 분석치는 N-PO₄, Ca-Mg는 각각 회귀계수는 0.56, 0.33이었다.

N-PO₄, Ca-Mg 유사한 양분흡수특성을 이용한 제어는 상추를 포함한 다른 작물에 확대하여 추가적인 연구로 명확한 결과 값 도출이 필요하지만 본 연구와 Kim et al.(2001)의 결과를 종합하여 판단할 때 N에 대한 PO₄의 양분흡수비는 0.55~0.58로

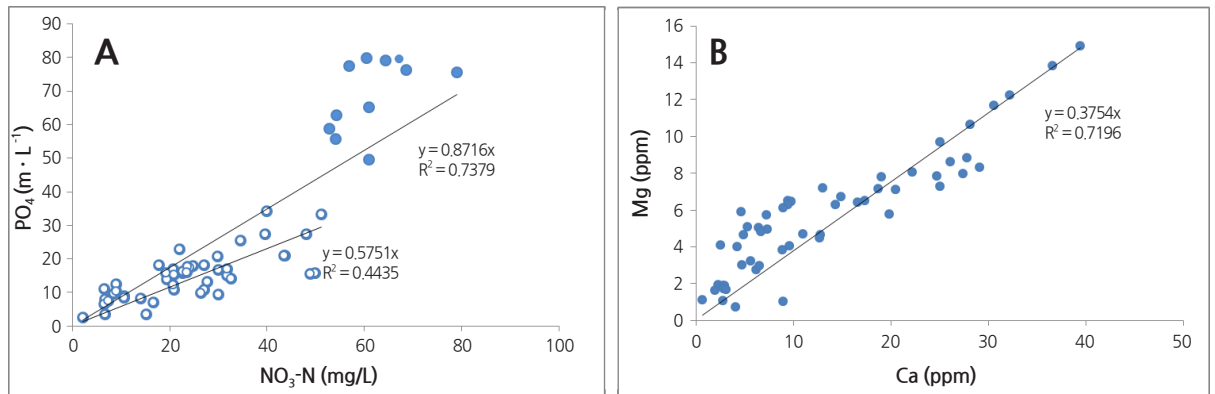


Fig. 3. Correlation between uptake of the ions PO₄ and N (A), and Mg and Ca (B): combination of results from the first and second experiments in lettuce.

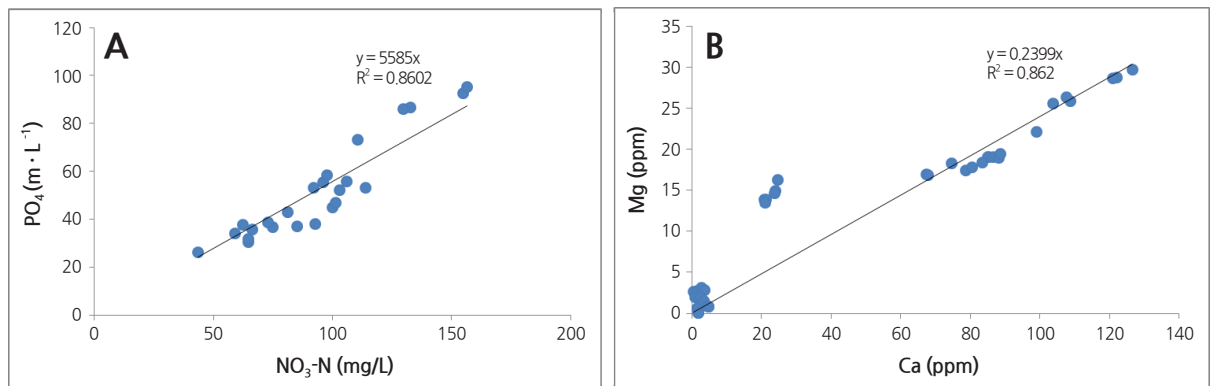


Fig. 4. Correlation between uptake of the ions PO₄ and N (A), and Mg and Ca (B) in pak choi.

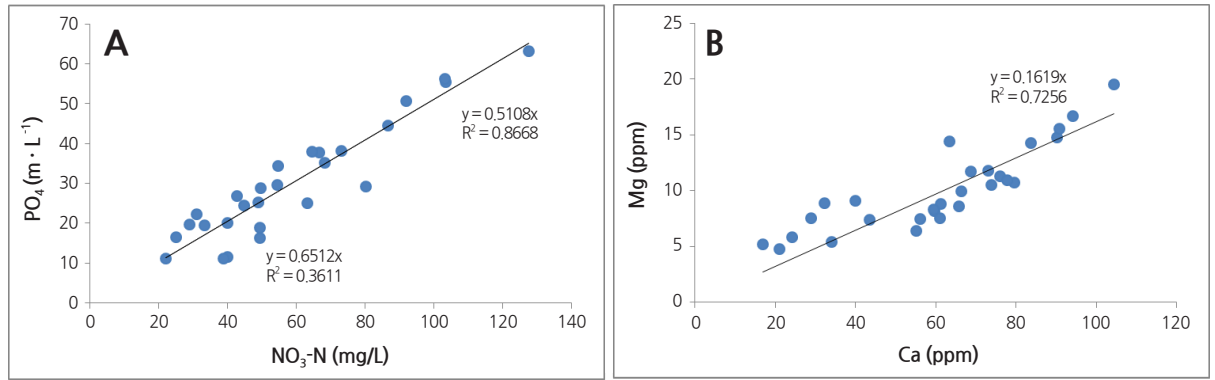


Fig. 5. Correlation between uptake of the ions PO_4 and N (A), and Mg and Ca (B) in rose.

모든 작물에 공통적으로 적용할 가능성이 있으며 Ca에 대한 Mg의 양분흡수비 작물에 따라서 다르게 설정해야 할 것으로 생각되지만 순환식 양액조성시 이온흡수 상관관계식을 제어인자로 추가할 수 있을 것으로 판단된다.

순환식 수경재배에서 개별 이온의 실시간 제어를 위하여 센서와 장비 개발에 관한 연구가 지속적으로 이루어지겠지만 단기간에 이온제어가 실용화되기는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 이 연구는 먼저 상용화 가능한 센서를 이용하여 상용화가 어려운 이온의 조절은 다른 방법으로 순환식 수경재배에서 꼭 해결되어야 할 과제에 접근하였다는데 의의가 있다

초 록

일반적인 순환식 수경재배에서는 배액을 원수로 희석하여 EC기준으로 제어하기 때문에 순환되는 배양액은 필연적으로 이온 불균형이 발생한다. 따라서 이 연구는 상용 가능성이 높은 일부 이온센서(N, K, Ca)를 이용한다는 전제 하에 작물의 필수원소인 N, P, K, Ca, Mg를 이온 단위로 자동제어 할 수 있을지 검토하고자 수행하였다. 상추를 재료로 배양액 내 이온 흡수량을 2회 조사하여 양분흡수패턴과 흡수된 이온간의 흡수 상관관계를 분석하였다. PO_4 는 N과, Ca는 Mg와 비슷한 흡수패턴을 나타냈고 센서로 측정 가능한 이온들 중에서 PO_4 는 N과 Ca는 Mg간의 상관계수도 가장 높았다. 회귀분석의 결과 도출된 N- PO_4 간의 회귀계수는 두 번의 시험의 결과가 1.04와 0.55로 다르게 나타났으나 Ca-Mg는 0.35와 0.40으로 거의 유사한 수치를 나타내었다. 청경채, 장미를 이용하여 상관관계 적합성을 검증하고 더불어 작목확대 가능성을 검토하고자 추가 시험을 수행하였다. 청경채의 N- PO_4 , Ca-Mg 이온간의 R^2 은 모두 0.86과 0.86이었고 장미는 각각 0.87, 0.73으로 이었다. 회귀계수는 청경채는 0.56, 0.24이고 장미는 0.51, 0.16이었다. 종합적으로 판단했을 때 N- PO_4 는 상추에서 반복 시험간의 결과 일치하지는 않았음에도 전체적으로는 상추, 청경채, 장미가 회귀계수가 0.55~0.58로 유사하게 나타나 모든 작물에 공통적으로 적용 가능성이 있지만 Ca-Mg는 작물별로 다른 계수가 필요하다고 판단되었다. 순환식 수경재배에서 개별 이온의 실시간 제어를 위하여 센서와 장비 개발에 관한 연구가 지속적으로 이루어지겠지만 단기간에 이온제어가 실용화되기는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 이 연구는 먼저 상용화 가능한 센서를 이용하여 상용화가 어려운 이온의 조절은 다른 방법으로 순환식 수경재배에서 꼭 해결되어야 할 과제에 접근하였다는데 의의가 있다.

추가주요어: 결정계수, 배양액, 상추, 상관분석, 장미, 청경채, 회귀계수

Literature Cited

- Ahn, T.I., J.W. Shin, and J.E. Son (2010) EC 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. 'Boogie'). Journal of Bio-Environment Control, 19(4):298-304
- Ahn, T.I., and J.E. Son (2011) 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 pepper plants (*Capsicum annuum* L. 'Fiesta'). Kor. J. Hort. Sci. Technol. 29(1):29-35
- Choi, G.L., M.W. Cho, T.C. Seo, M.Y. Roh, H.C. Rhee, and S.Y. Lee (2008) Change in uptake and tissue contents of N, P, and K at different growth stages in hydroponically-grown cut roses. Journal of Bio-Environment Control. 17(4): 247-251
- Choi, G.L., J.W. Cheong, H.C. Rhee, K.H. Yeo, and N.J. Kang (2013) Effect of EC level on the growth of major leafy vegetable in hydroponics. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 31(SUPPL. II):62
- Feng, C., W. Cali, and T. Yonging (2011) Virtual ion selective electrode for online measurement of nutrient solution components. Sensors Uournal, IEEE 11(2):462-468. doi:10.1109/JSEN.2010.2060479
- Gieling, T.H., G.V. Straten, H.J.Janssen, and H. Wouters (2005) ISE and chemfet sensors in greenhouse cultivation. Sensors and Actuators B 105:74-80
- 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
- Kim, H.J., J.W. Hummel, and S.J. Birrell (2006) Evaluation of nitrate and potassium ion-selective membranes for soil macronutrient sensing. ASABE 49(3):597-606. doi:10.13031/2013.20476
- Kim H.J., J.H. Kim, Y.H. Woo, W.S. Kim, and Y.I. Nam (2001) Nutrient and water uptake of tomato plants by growth stage in closed perlite culture. J. Kir. Soc. Hort.Sci.42(3):254-258
- Kim, H.J., W.K. Kim, M.Y. Roh, C.I. Kang, J.M.. Park and K.A. Sudduth (2013) Automated sensing of hydroponic macronutrients using a computer-controlled system with an array of ion-selective electrodes. Computers and Electronics in Agriculture. 93:46-54
- Kwon, O.H., W.H Kim, S.Y Lee, H.J Lee, and K.S. Cheon (2014) Effect of Drainage Mixing Ratio for Rose Substrate Culture in a Closed System. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 32(Suppl I): 171
- Lee, Y.H., K.S. Park, and Y.B. Lee (2005) Optimum Renewal Time of Nutrient Solution for Rose Substrate Culture in a Closed System. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 23 (SUPPL. I): 127
- Morard, P (1997) Possible use of ion selective electrodes for nutrient solutions in recirculated systems. Proc. 9th Internat. Congr. Soilless culture, Jersey, 1996. ISOSC, Wageningen, The Netherlands, 1996. 291-298
- Roh, M.Y., G.L. Choi, H.C. Rhee, T.C. Seo, W.S. Kim, and Y.B. Lee (2009) Changes in nutrient element concentrations and growth of cucumber plants (*Cucumis sativus* L. cv. Joeun Baegdadagi) as affected by nutrient solution composition in recirculating hydroponic systems. Journal of Bio-Environment Control, 18(4):363-369
- Savvas, D. and G. Manos (1999) Automated control of nutrient solution in closed soilless culture systems. J. Agric. Engng Res. 73:29-33. doi:10.1006/jaer.1998.0389
- Sonneveld, C (2002) Composition of nutrient solutions, pp. 179-210. In: D. Savvas and H. Passam(eds.). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo publications, Athens, Greece
- Yang, E.Y., J.S. Oh, and Y.B Lee (2003) Effect of mineral nutrient control on nutrient uptake, growth and quality of rose in closed system. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 21 (SUPPL. II):104