

등가 이온 총량에 따른 EC 추정과 이온 균형 모형

소재우¹ · 이용범^{2*}

¹국립원예특작과학원 원예특작환경과, ²서울시립대학교 환경원예학과

Estimated EC by the Total Amount of Equivalent Ion and Ion Balance Model

Jae-Woo Soh¹ and Yong-Beom Lee^{2*}

¹Department of Horticultural Environment, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Suwon 440-706, Korea

²Department of Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul 137-730, Korea

Abstract. To examine the EC model in a culture medium, basic culture medium of Rush (2005) and EC model of Robinson and Strokes (1959) were applied analyzing the equivalence ion total amount, the EC variable of cation and anion. Following the experiential translation by Steiner (1980), 130 optimized domestic and foreign culture media for crop growth were utilized, and estimated EC model was also demonstrated. Results from basic culture medium of Rush (2005) suggests an estimated EC by equivalence ion total amount and high reliable regressive model with $0.96 y = 1.33x - 0.23$ of 0.96 as value R^2 . It was found out that the change in concentration of positive ion and anion did not differ significantly with the increase and decrease of EC, however, there occurred a slight variable range. The change brings about a bigger anion influence than the previously reported positive ion, seemingly like those based on nitride ion and sulfur ion. The above EC estimated models confirmed that with optimized 130 domestic and foreign culture media for crop growth, the value derived will be as follows: $R^2 = 0.98$ with $y = 1.23x - 0.02$. In addition, the contour analysis of positive ion and anion for EC, with popularly known concentration range of EC $1.5 - 2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ reveals an equivalent of more than $11 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ for positive ion and $15 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ for anion. On the other hand, the left bottom, low concentration $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ and the right above, high concentration $2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, for both positive ion and anion existed differently in a proper culture medium concentration. This study adapted variables of both positive ion and anion of EC simultaneously, unlike in the previous culture medium by ion ratio in mutual ratio of Steiner (1980), and offers an EC model that can estimate levels or positive ion and anion in proper concentration, EC $1.5 - 2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, with distributed features of ions.

Additional key words: absorption pattern, hydroponics, mineral balance, mutual ratio, plant factory

서 언

식물 공장 시스템은 배양액 내 무기이온의 정밀 제어가 요구된다. 그 이유는 대량 생산 시스템에 따른 공급 배양액과 폐액량이 다른 수경재배 시스템보다 많아 비료와 수자원의 투입과 소모가 많아지기 때문이다. 따라서 식물의 최적 생육을 위한 배양액 조성(Steiner, 1980; Yamazaki, 1982), 배양액의 급배액 관리 기술(Bando et al., 1988; Chung et al., 1991; Roh et al., 1997, 2009; Sonneveld, 1993), 칼륨염의 추가 공급을 통한 EC 관리 기술(Rush, 2005), run-off out 기술(Adams, 1997; Benoit, 1992) 등이 연구되어 왔다. 수경

재배시스템은 배양액의 재순환 여부에 따라 순환식 시스템과 비순환식 시스템으로 구분하는데, 배양액 조성 특성과 작물의 생육 특성에 따라 근권부의 무기 이온 집적과 부족이 유발되는 것으로 알려져 있다(Roh et al., 2009; Rush, 2005). 순환식 수경재배 시스템의 특성상 지속적인 배양액 사용은 초기 배양액 농도와 비율이 재순환 기간과 횟수가 증가함에 따라 무기이온 간 불균형이 급속히 진행되는 것으로 알려져 있다(Soh and Lee, 2000; Zekki et al., 1996). 이들 연구는 배양액 내 무기이온 균형을 위한 배양액 조성과 식물 생육의 최적화에 바탕을 두고 있다. Steiner(1980)는 배양액 내 양이온과 음이온의 균형비를 통한 배양액 조성관리

*Corresponding author: hydropo@uos.ac.kr

※ Received 28 July 2012; Revised 15 August 2012; Accepted 16 August 2012.

방법에 대하여 주목하였으며, Robinson and Strokes(1959)와 Tanji(1960) 등은 배양액 내 무기 이온의 당량도를 추정하여 이들의 총합을 토대로 EC(equivalent ionic conductivity)를 산출하였다. Adams(1977)와 Ryu(1993)는 화학적 평형을 이룬 배양액에서 배양액 내 무기이온의 당량의 총합으로 EC를 해석하여 등가 이온 상수의 추정 모형을 보고하였다. 한편 Son and Okuya(1991)는 Robinson and Strokes(1959)의 각 이온별 등가 이온량 추정에서 배양액의 EC 변화에 따른 각 이온들의 완화 효과와 전기 영동 효과를 추정하기 어렵기 때문에 이들의 공통 부분 g값을 제외하고 이들을 상수로 재정의하여 추정하는 모형을 제안하였다. 배양액 균형에 관한 연구에서 Steiner(1980)는 배양액 내 무기 이온을 각각의 양이온과 음이온별 mutual ratio로 설정하여 무기 양분의 균형 모형을 제시하였다. Ahn et al.(2010)은 파프리카

순환식 수경재배에서 Steiner의 배양액 추정 모형을 이용하여 EC 기준의 배액률에 따른 이온 변화를 분석하였는데, 양이온 K^+ , Ca^{2+} 과 음이온 NO_3^- , SO_4^{2-} 중심으로 나타났다고 하였다. 그러나 양이온과 음이온 간 상호 작용에 따른 EC 변화와 그 변량에 대한 모형에 대한 연구는 미흡하다. 따라서 본 연구는 배양액 내 다량 원소의 농도와 그 비율에 대한 해석을 토대로 등가 이온의 추정에 따라 양이온, 음이온, EC의 변량에 대한 모형을 구명하고자 한다.

재료 및 방법

배양액 내 무기이온 농도 변화에 따른 EC 변량에 관한 실험은 Rush(2005)의 조성 방법에 따라 다량원소 N, P, K, Ca, Mg, S의 무기 이온 농도를 조성하였다(Table 1). 배양액

Table 1. Rush's design (2005) of the ionic variate of macro minerals.

Treatments	Equivalent ionic conductivity (meq·L ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
1	1.00	1.48	0.91	1.46	0.67	0.67
2	1.33	1.68	1.03	1.65	0.76	0.76
3	1.50	1.50	2.33	1.37	2.19	2.19
4	2.00	1.20	1.80	1.20	1.85	1.85
5	2.35	3.30	2.06	3.30	1.51	1.51
6	3.52	5.22	3.23	5.14	2.37	2.37
7	5.73	2.96	1.82	2.92	1.34	1.34
8	11.47	5.92	3.65	5.84	2.68	2.68
9	14.34	7.40	4.56	7.30	3.35	3.35
10	17.20	8.88	5.47	8.77	4.02	4.02
11	20.06	10.36	6.39	10.23	4.69	4.69
12	22.93	11.84	7.30	11.69	5.36	5.36

Table 2. Classification of the used nutrient solution.

Authority organization	Crops	Division of nutrient solution
University of Seoul	Leaf lettuce, butter-head and head lettuce, endive, chicory, cucumber, green pumpkin, paprika, green pepper, tomato, cherry tomato, potato, strawberry, rose, dill, basil	Growth phase on recycling system
Netherlands	Head lettuce, endive, cucumber, paprika, tomato, potato, strawberry, rose, chrysanthemum, lily, gerbera, carnation, alstroemeria, bouvardia, common gypsophila, statice, anemone, aster, freesia, cymbidium, phalaenopsis, flowerpot	Hydroponic system
Belgium	Butter-head and head lettuce, cucumber, melon, paprika, tomato, egg plant, strawberry, dill, basil, herbs	Hydroponic system
National Institute of Horticultural & Herbal Science	Green vegetables, cucumber, green pumpkin, green pepper, paprika, tomato, egg plant	Hydroponic system
Yamazaki	Lettuce, spinach, Japanese honewort, cucumber, melon, paprika, tomato, egg plant, strawberry, general purpose	None
Aichi Agricultural Institute	Spinach, water dropwort, rose, carnation	None
Others	General purpose	None

Table 3. Summary of previous studies for equivalent ionic conductivity.

Reference	Equivalent ionic conductivity ($\Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$)								
	NO_3^-	NH_4^+	H_2PO_4^-	K^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	SO_4^{-2}	Na^+	Cl^-
Adams, 1977	71.46	73.55	36.00	73.50	59.50	53.50	80.02	50.10	76.40

에 대한 EC 추정 모형의 실증은 국내의 수경재배에서 많이 활용하는 130종의 주요 배양액을 선정하였는데, 서울시립대학교 배양액 21종, 국립원예특작과학원 배양액 10종, 네덜란드 배양액 34종, 벨기에 배양액 16종, 일본 원예시험장 배양액 16종, 야마자키 배양액 17종, 아이찌현 배양액 6종, 기타 배양액 10종을 이용하였다(Table 2).

수경재배용 배양액에 사용되는 각 다량원소의 stock solution을 만들고, 이를 각각의 배양액 기준에 따라 1배액 배양액을 50mL씩 3반복으로 조성하였다. 배양액 내 이온 농도 측정에는 EC meter(CM-20J, DKK-TOA Corp., Japan)를 이용하였다. 등가이온총량(K)은 Adams(1977)의 방법에 따라 각각의 배양액 내 무기이온의 등가 전도 상수(λ^0)와 노르말 농도 값(C_i)을 이용하여(Table 3), Robinson and Stokes(1959)의 방법에 따라 $K = (1/1000) \sum C_i \cdot \lambda_0$ 로 추정하였다. 상기의 등가이온총량에 의하여 동량의 무기이온들의 EC 변화에 대한 EC 모형을 추정하였다. 상기의 통계 분석은 SAS(Ver. 9.02, SAS Institute Inc., USA)와 Minitab(Ver 15.1, Minitab Inc., USA)을 이용하여 regression analysis, standardization analysis, contour analysis를 수행하였다.

결과 및 고찰

Rush(2005)의 무기 이온 설계에 따라 배양액을 조성한 다음 Robinson and Stokes(1959)에 의한 등가이온총량으로 EC 추정값과 EC 측정값에 대해 회귀 분석하였다(Fig. 1). R^2 값 0.96의 $y = 1.33x - 0.23$ 의 높은 선형 관계성을 보여 등가이온총량으로 EC 값을 추정할 수 있었다. 또한 EC 측정값 간의 분포 특성을 살펴보면, EC 측정값 $1.55 \text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 를 제외하고 95% 신뢰 수준 안에서 분포하는 특성을 나타냈다. 95% 신뢰 수준을 벗어난 $1.55 \text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 의 원인을 구명하기 위해 본 연구에서 사용한 Rush(2005)의 배양액을 표준화하고 이와 비교하였다(Fig. 2). Rush(2005)의 조성 배양액 내 무기이온의 표준화값과 EC $1.55 \text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 의 HPO_4^- , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{-2} 은 대부분 일치하였으나 NO_3^- 는 각각 0.35와 0.86으로 2배가 넘는 차이를 보여 EC $1.55 \text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 의 배양액은 질소가 낮게 설계되어 EC 관측값과 등가이온총량에 의한 EC 추정 간의 차이가 나타났다. 하지만 Robinson and Stokes(1959)에 의한 등가이온총량에 의한 EC 모형 추정은

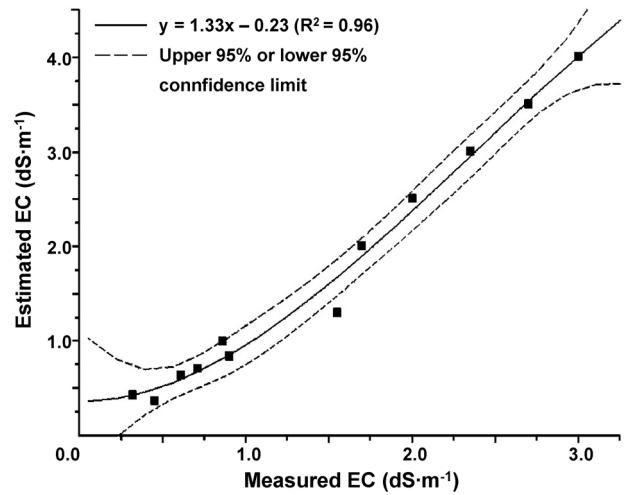


Fig. 1. Linear regression analysis of Rush's fundamental solution between measuring EC and Estimating EC.

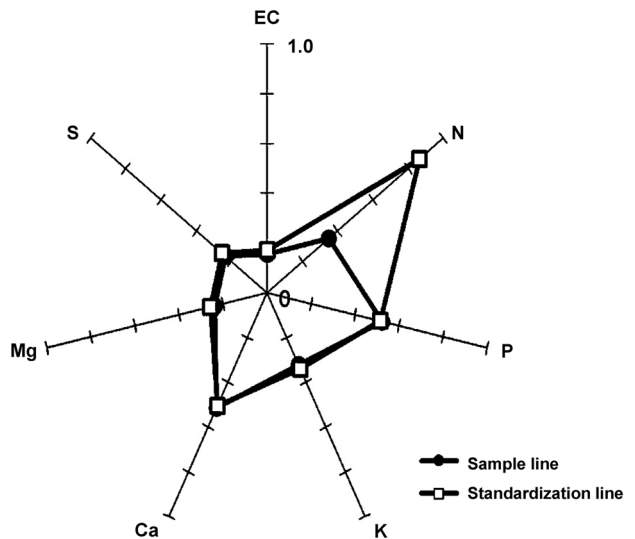


Fig. 2. Comparison between sample line of measured EC $1.55 \text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ and standardization line.

$R^2 = 0.96$ 값의 높은 회귀 모형과 Rush(2005)에 의해 설계된 배양액의 EC 변화가 신뢰 수준에서 대부분 분포하기 때문에 신뢰성 높은 EC 모형을 추정할 수 있었다.

Rush(2005)에 의한 설계된 배양액을 토대로 양이온과 음이온간의 EC에 대한 영향에 대한 변화를 분석하였다(Fig. 3). 양이온과 음이온의 농도가 높아질수록 EC가 높아지는 것으로 나타난 그동안 배양액 EC에 관한 많은 보고와 일치하였다(Roh et al., 2009). 하지만 양이온, 음이온, EC의 변

화가 상호간의 평면적으로 반응하지 않고 소폭의 변화량을 보였다. 여기서 양이온과 음이온의 EC 변화에 대한 반응을 보면, 음이온에 의한 EC 변량이 더 큰 것으로 나타나 양이온에 의한 EC 영향이 크다는 기존의 연구와 상이하였다(De Krijg et al., 1999; Rush, 2005). 이는 순환식 수경재배의 배양액에 대한 연구가 고행배지경의 배양액 내 이온변화, 배양액량, 재순환에 의한 배양액 보정에 주목하여(Sonneveld, 2000), 이에 대한 연구가 주로 이루어졌기 때문으로 생각된다. 따라서 다소 상이한 실험 결과가 배양액의 초기 조성 시 양이온과 음이온 간의 EC 영향도 또는 각 이온들이 EC에 대한 영향도에 차이에 기인한 것인지 명확히 할 필요가 있다. 아울러 본 연구에서 사용된 Rush(2005)의 배양액이 실제 재배에서는 거의 사용되지 않는 배양액의 조성 기준으로 질소가 $15\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 이상 다량 함유된 $\text{EC } 3.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 이상의 고농도 배양액이어서 이와 같은 결과가 나타날 수 있기 때문에 각 무기이온이 EC 변량에 대한 영향에 대하여 표준화 분석을 수행하였다(Fig. 4). 배양액 내 무기이온이 EC에

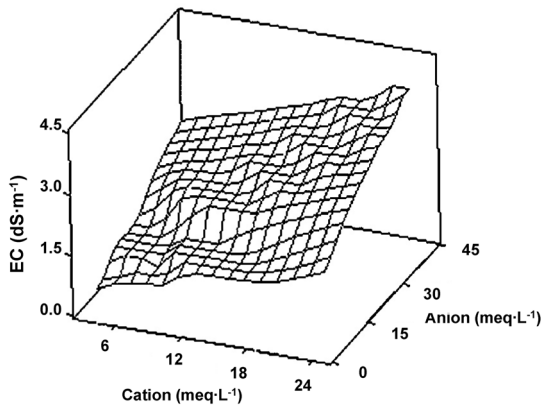


Fig. 3. Surface plot between cation and anion and estimated EC.

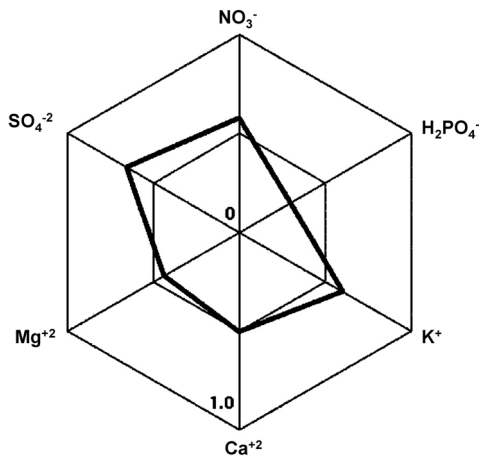


Fig. 4. Rader chart of the degree of directing impact on the estimated EC of macro elements.

대한 변화량에 대해 0.5 이상 영향을 주어 원소는 $\text{NO}_3\text{-N}$, K^+ , $\text{SO}_4\text{-S}$ 으로 나타나 양이온은 1개, 음이온은 2개의 원소가 다른 무기이온에 비하여 EC 변화량에 크게 작용하였다. 야마자키 순환식 배양액으로 조성한 토마토 암면 배지경에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 지속적으로 감소하지만(Bando, 1991; Bando et al., 1988) 오이 순환식 펄라이트 배지경에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 지속적으로 증가한다고 하였다(Roh et al., 2009). 이는 작물 종류와 배지 특성에 따라 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 증가와 감소가 다른 양상을 보이는데 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 EC에 대한 변량에 대한 영향이 가장 큰 것으로 볼 때 배양액을 재사용하는 순환식 수경재배에서 배양액의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 초기 배양액 설계가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. $\text{SO}_4\text{-S}$ 는 다량원소임에도 불구하고 그동안 배양액 조성 설계 과정에서 비중 있게 다루지 않았는데, EC 변화에 높은 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 국립원예특작과학원 오이 배양액으로 조성한 순환식 펄라이트 배지경에서 $\text{SO}_4\text{-S}$ 는 지속적으로 증가된다고 하였는데(Roh, 2009), $\text{SO}_4\text{-S}$ 가 EC 변화량에 대한 영향도가 큰 것으로 나타났다기 때문에 식물공장과 같이 정밀제어가 요구되는 순환식 재배 시스템의 배양액은 조성에서 면밀한 $\text{SO}_4\text{-S}$ 의 재설계가 필요할 것으로 생각된다. 순환식 고행배지경에서 K^+ 은 생육 전반에 걸쳐 지속적으로 감소하는데, 오이 순환식 펄라이트 배지경(Roh et al., 2009)과 토마토 암면 배지경(Bando et al., 1988)에서 나타나며 특히 생식 생장기에 K^+ 의 감소가 현저하다고 하였다(Masuda et al., 1989). 이는 생육상의 전환에 따른 무기이온의 흡수 차이로 인하여 배양액 내 이온변화를 유발되기 때문에 생식생장으로 전환되는 시점에서 $\text{PO}_4\text{-P}$ 와 K^+ 의 추가 보정이 필요하다고 하였다(Bando et al., 1988). 즉 과채류 고행배지경에서 지속적으로 감소하는 K^+ 은 본 결과와 같이 EC 변화량에 영향도가 큰 K^+ 의 지속적인 저하는 EC 변화에 크게 작용할 것으로 생각된다. 이러한 현상은 파프리카 순환식 수경재배의 EC와 이온 간 비율 변화에서 mutual ratio 분석을 통해 K^+ , Ca^{2+} , $\text{SO}_4\text{-S}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 중심으로 EC가 변하는 것으로 보고된 바 있는데(Ahn et al., 2010), 그 원인이 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{SO}_4\text{-S}$, K^+ 가 EC 변량에 대한 영향도가 크게 작용하기 때문으로 생각된다. 특히 이러한 현상은 근권 내 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도와 EC 변화 추이와 유사하게 나타나며(Ishihara, 2006), 순환식 수경 재배에서 배양액의 재사용에 따른 배양액 초기 설계와 차이가 커져서 EC 변화와 근권부 이온 집적이 함께 나타난다(Sonneveld, 2000). 따라서 EC 변량에 영향이 높은 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{SO}_4\text{-S}$, K^+ 의 배양액 초기 재설계되어야 생육기간내 근권부의 이온 집적과 EC 변화가 경감될 것으로 생각된다.

모든 배양액의 설계는 작물 생육이 최적의 상태에 도달하

도록 구성되어 있다. 따라서 국내외적으로 많이 사용되는 배양액 130종의 배양액을 선정하여 상기의 Rush(2005)에 의한 배양액을 EC 추정모형에 따라 분석하였다(Fig. 5). EC 측정값과 등가이온총량에 의한 EC 추정값 간에 $R^2 = 0.98$ 의 $y = 1.23x + 0.02$ 의 신뢰성 높은 회귀 관계를 보였다. Rush(2005)에서 설계한 12종의 표준 배양액의 표준화 분석과 달리 130종의 배양액은 분석 표본이 충분하기 때문에 양이온과 음이온의 EC 변량 추이를 contour 분석을 수행하였다(Fig. 6). 배양액 내 양이온과 음이온의 함량에 따라 대칭적으로 EC 변화에 영향을 주지 않고, EC $1.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 이하 범위는 좌측 하단 방향으로 타원형의 경계를 보였다. 본 연구에서 사용된 배양액은 작물 재배에 적합하도록 설계된 130종의 배양액이기 때문에 EC $1.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 이하의 저농도에서는 양이온과 음이온 간의 상호 관계가 보다 복잡한 것으로 나타났다. EC $1.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 범위는 좌측 하단을 향한 EC $1.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 이하의 분포 특성에 따라 양이온과 음이온의

각각의 축에 넓게 분포하였다. EC $2.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 는 양이온과 음이온의 대각선 경계처럼 나타났다. EC $2.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 범위는 우측 상단으로 타원형의 경계를 보였다. EC $1.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 범위는 일반적인 작물 재배의 적정 EC 농도인데, EC $1.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 이상의 배양액 조성을 위해서는 양이온 $11\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 이상, 음이온 $15\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 이상으로 나타났다.

이는 작물 및 생육기, 재배 시스템, 재배 지역의 기후 등에 따라 최적화된 배양액들이 갖는 특성으로 생각된다. 배양액 특성에 따라 양이온 또는 음이온의 EC에 대한 변량이 상이하게 나타나고 이온 밸런스도 다양하게 분포할 수 있다는 것으로 생각된다.

이온간의 함량 비율만을 설정하는 Steiner(1980)의 mutual ratio에 의한 배양액 설계와 달리 양이온과 음이온의 특성을 함께 설계한 EC 모형을 추정하였고, 일반적으로 알려진 작물의 최적 배양액 농도는 EC $1.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 의 범위인데 상기의 연구 결과는 이와 같은 범위에서 양이온과 음이온의 분포 특성을 구명하였다. 또한 국내외적으로 알려진 130종의 수경재배 배양액 기준을 토대로 양이온과 음이온의 등가이온총량 모형을 추정하고 변화량에 대한 균형비를 실증하였다. 본 연구에서 사용된 130종의 수경재배 배양액 기준은 그동안 작물의 최적 생육 결과를 토대로 조성된 배양액 기준이므로 작물 생육의 최적 근권 환경을 기초로 한 배양액 이온 균형에 관한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 향후 더 많은 표본 배양액을 설계하여 EC와 각각의 이온 간 함량 비율에 따른 입체 모형을 추정하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

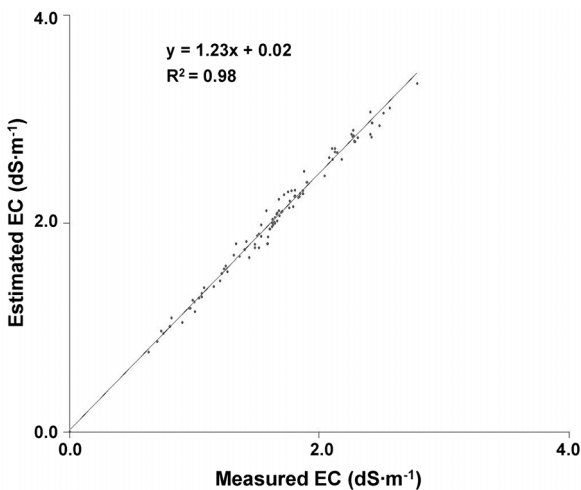


Fig. 5. Regression analysis of 130 kinds of nutrient solutions between measured EC and estimated EC.

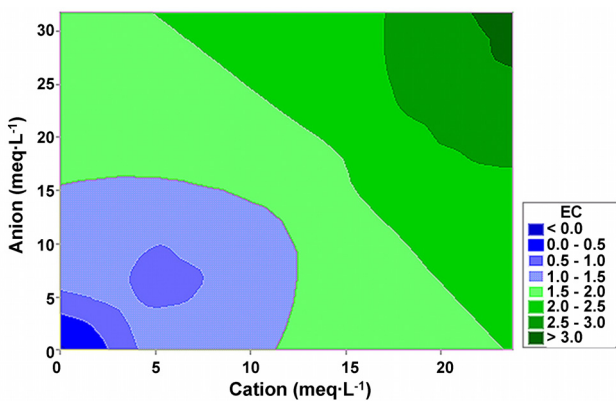


Fig. 6. Contour plot among cation and anion and measured EC.

초 록

본 시험은 배양액 내 EC 모형을 구명하기 위해 Rush(2005)의 기본 배양액을 설계하여 Robinson and Strokes(1959)의 등가이온총량에 따라 EC 모형을 추정하고, 양이온과 음이온 및 무기이온간의 EC 변량에 대하여 분석하였다. Steiner(1980)의 경험적 해석을 위해 작물 생육에 최적화된 국내외 130종 배양액을 사용하여 EC 추정 모형을 실증하였다.

Rush(2005)의 기본 배양액을 등가이온총량으로 EC 추정 한 결과 R^2 값 0.96의 $y = 1.33x - 0.23$ 의 신뢰성 높은 회귀 모형을 추정하였다. 양이온과 음이온의 농도 변화가 EC의 증감 변화와 일치하지만 그 평면적으로 변화하지 않고 변량 폭을 보였다. 그 변화는 기준에 보고된 양이온의 영향보다 음이온의 영향이 더 큰 것으로 나타났는데, 질소 이온과 황이온에 기인한 것으로 생각된다. 이상의 EC 추정 모형을 작물 생육이 최적화된 국내외 130종의 배양액을 이용하여 재

확인하였는데, $R^2 = 0.98$ 의 $y = 1.23x - 0.02$ 를 나타냈다. 또한 EC에 대한 양이온과 음이온의 contour 분석에서 적정 배양액 농도 범위로 알려진 EC $1.5-2.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 는 양이온 $11\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 이상, 음이온 $15\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 이상인 것으로 나타났다. 좌측 하단의 $1.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 저농도와 우측 하단의 $2.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 고농도에서 타원형 분포를 나타내어 적정 배양액 농도 범위에서 양이온과 음이온은 다양하게 분포하는 것으로 나타났다. 본 연구는 Steiner(1980)의 mutual ratio에서 이온 간 함량 비율에 의한 배양액 설계와 달리 EC에 대한 양이온과 음이온의 변량을 동시에 적용함으로써 이온간의 분포 특성과 적정 배양액 농도 EC $1.5-2.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 의 양이온과 음이온의 수준을 추정할 수 있는 EC 모형을 제시하였다.

추가 주요어 : 흡수 특성, 수경재배, 이온 밸런스, 상호 비율, 식물공장

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. 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'). J. Bio-Env. Con. 19:298-304.

Bando, K., H. Machida, and H. Kodo. 1988. Establishment of the productive techniques of rock wool culture on tomatoes. Effect of nutrient concentration on the quality and yield of tomato in circular solution culture. Bull. Tokushima Agric. Exp. Stn. 25:27-35.

Bando, K. 1991. Recirculating rockwool culture of tomato. Agr. Hort. 66:61-66.

Benoit, F. 1992. Practical guide for simple soilless culture techniques. European Vegetable R & D Center, Belgium. p. 28-37.

Chung, S.J., B.S. Seo, and B.S. Lee. 1991. Studies on the levels of nitrogen, potassium and its interaction on the growth and development of hydroponically growth tomato. Proc. Kor. Soc. Bio-Env. Con. Conf. 10:70-71.

De Kreijl, C., W. Voogt, and R. Baas. 1999. Nutrient solutions and water quality for soilless cultures, Brochure 196. Research Station for Floriculture and Glasshouse Vegetables (PBG), Naaldwijk, The Netherlands.

Ishihara, Y., H. Hitomi, and Y. Yamaki. 2006. Effect of nutrient

composition used in the closed hydroponics system with capillary uptake method on nutrient element concentrations in the organic substrates and yield of tomato. Hort. Res. 5:265-270.

Masuda, M., T. Takiguchi, and S. Matsubara. 1989. Yield and quality of tomato fruits, and changes of mineral concentration in different strengths of nutrient solution. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 58:641-648.

Robinson, R.A. and R.H. Stokes. 1959. Electrolyte solutions. Courier Dover Publications, London.

Roh, M.Y., Y.B. Lee, H.S. Kim, K.B. Lee, and J.H. Bae. 1997. Development of nutrient solution suitable for closed system in substrate culture of cucumber. J. Bio-Env. Con. 6:1-14.

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. J. Bio-Env. Con. 18:363-369.

Ryu, K.H. 1993. Measurement on nutrient solution. J. Bio. Fac. Env. 2:147-149.

Soh, J.W. and Y.B. Lee. 2000. Development of calculation program and control of nutrient minerals in the plant factory for lettuce. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 18:146. (Abstr.)

Son, J.E. and T. Okuya. 1991. Prediction of electrical conductivity of nutrient solution in hydroponics. J. Agr. Met. 47: 159-163.

Sonneveld, C. 1993. Hydroponic growing in closed systems to safeguard the environment. Australia Hydroponic Conf. Hydroponics Environ. Monash University Melbourne Australia 17-19. Feb. p. 21-36.

Sonneveld, C. 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Ph.D. Thesis. University of Wageningen, The Netherlands.

Sonneveld, C. 2002. Composition of nutrient solutions, p. 179-210. In: D. Savvas and H. Passam (eds.). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo publication, Athens, Greece.

Steiner, A.A. 1980. The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. Acta Hort. 98:87-97.

Tanji, K.K. 1960. Predicting specific conductance from electrolytic properties and ion association in some aqueous solution. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 33:887-889.

Yamazaki, K. 1982. Management of pH in nutrient solution in hydroponics. Agri. Hort. 57:711-717.

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.