

순환식 수경재배시 배양액조성에 따른 배양액 양분농도 변화 및 오이 생육

노미영¹ · 최경이¹ · 이한철¹ · 서태철¹ · 김완순^{2*} · 이용범²
¹국립원예특작과학원 시설원예시험장, ²서울시립대학교 환경원예학과

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

Mi Young Roh¹, Gyeong Lee Choi¹, Han Cheol Rhee¹, Tae Cheol Seo¹,
Wan Soon Kim^{2*}, and Yong Beom Lee²

¹Protected Horticulture Research Station, NIHHS, RDA, Busan 618-800, Korea
²Dept. of Environmental Horticulture, Univ. of Seoul, Seoul 130-743, Korea

Abstract. This experiment was conducted to find out the effect of nutrient solution composition on the growth of cucumber plants and the changes in macro-elements in nutrient solutions in recirculating hydroponic systems. Cucumber plants (*Cucumis sativus* L. cv. Joeun Baegdadagi) were grown in closed perlite cultivation systems supplied with different nutrient solutions developed by NHRS (National Horticultural Research Station in Japan), Yamasaki, PBG (Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente), and NIHHS (National Institute of Horticultural and Herbal Science in Korea). The concentrations of NO₃-N, Ca²⁺, Mg²⁺, and SO₄-S in the recycled nutrient solutions increased but that of NH₄-N decreased gradually in all the treatments. The PO₄-P and K⁺ concentrations were continuously reduced from the beginning of the harvest to the harvest peak period. There were no significant differences in the concentrations of NO₃-N, NH₄-N, and Ca²⁺ in the recirculated nutrient solutions among four treatments, while the concentrations of PO₄-P and K⁺ were lowest and those of Mg²⁺ and SO₄-S were highest in the treatment of Yamasaki's nutrient solution. All growth-related parameters of cucumber plants except for leaf number were not significantly affected by the nutrient solution compositions. Due to its low concentrations of PO₄-P and K⁺ in the recycled nutrient solution, however, the number and yield of cucumber fruits were lowest in the treatment of Yamasaki's nutrient solution.

Key words : drainage, hydroponics, nutrient ratio, nutrient solution recycling

서 론

수경재배방식은 작물을 재배하면서 배출되는 배액(排液)의 폐기 또는 회수 여부에 따라 비순환식 수경재배와 순환식 수경재배로 구분된다. 근년 들어 농업을 비롯한 모든 산업에서 환경을 보전하기 위한 친환경 기술 개발이 활발히 진행되고 있고 수경재배에서도 작

물 재배에 사용하고 남은 배액의 배출을 최소화하기 위한 친환경 순환식 수경재배 기술 개발에 대한 연구가 이루어지고 있다.

순환식 수경재배에서 배양액을 교체하지 않고 계속 사용하면 순환되는 배양액과 초기에 사용한 배양액간의 무기양분 비율 및 농도가 달라지므로(Bando 등, 1988; Sasaki와 Toshitaka, 1978; Yamashita와 Hayashi, 1997), 이러한 변화를 줄이기 위해서는 배양액조성에 대한 검토가 필요하다(Bando와 Machida, 1992). 순환식 수경재배시스템을 이용하여 배양액을 재순환할 경

*Corresponding author: rohmy17@rda.go.kr
Received September 17, 2008; Revised October 4, 2009;
Accepted December 5, 2009

우, Zekki 등(1996)은 무기양분 비율간의 불균형이 신속하게 일어난다고 하였고, Sonneveld(1981, 2002)는 Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 SO_4^{2-} 와 같은 2가 이온들의 축적이 발생하여 배양액내 무기양분 조성이 변화된다고 보고하였다.

현재 오이 수경재배용으로 여러 종류의 배양액조성(Roh 등, 1997; Sonneveld와 Straver, 1992; Yamasaki, 1984)이 개발되어 있고, Roh 등(1997)은 순환식 수경재배시 배양액조성에 따른 오이 작물의 생육 특성에 대하여 보고한 바 있다. 그러나, 배양액조성을 달리하여 지속적으로 배양액을 재순환하였을 때 배양액내 무기양분 농도의 변화에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구는 주지착과성이 높은 반백계 오이품종을 이용하여 순환식 수경재배시 배양액조성에 따른 배양액내 무기양분 농도의 변화를 구명하고 그에 따른 오이의 생육 반응을 조사하고자 수행되었다.

재료 및 방법

‘조은백다다기’ 오이품종을 시험재료로 하여 국립원예특작과학원 시설원예시험장 내에 있는 유리온실(폭 6.5m × 길이 25m × 동고 3m)에서 시험을 수행하였다. 최야시킨 종자를 2004년 4월 21일에 육묘용 상토가 들어있는 50공 플러그 트레이에 파종하고, 5월 18일에 펠라이트가 들어있는 베드(폭 38cm × 길이 200cm × 깊이 15cm) 위에 각각 10주씩 정식하였다. 배지는 정식 전에 $EC\ 1.2dS \cdot m^{-1}$ 의 배양액으로 포수시켰다. 베드는 1/200의 경사를 주고 바닥 부분에 배수구를 뚫어 공급된 배양액이 흘러나오도록 하였으며, 배수구를

통해 흘러나온 배양액을 순환하여 재사용할 수 있도록 정식베드 아랫부분에 140L 용량의 급배액 용기와 290W 모터펌프를 설치하였다. 또한, 배지내 수분이 대기 중으로 증발되는 것을 막기 위하여 흑백 플라스틱 필름으로 베드 위를 멀칭하였다.

시험에 사용된 배양액조성은 일본 원시 배양액, 야마자키 오이 배양액(이후 야마자키 배양액), PBG 오이 순환식 배양액(이후 PBG 배양액) 및 원예원 오이 순환식 배양액(이후 원예원 배양액)이었다(Table 1). 원예원 배양액은 다른 배양액조성과는 달리 과실수확 최적기에 접어들면서 배양액내 NO_3-N , Mg^{2+} , SO_4-S 등의 농도가 증가되는 것을 억제하기 위하여 이들 성분의 농도를 다소 낮추도록 조성한 배양액이다. 초기에 사용한 배양액의 EC는 정식 직후부터 정식후 7일까지는 $1.2dS \cdot m^{-1}$, 정식후 8일부터 21일까지는 $1.6dS \cdot m^{-1}$, 정식후 22일부터 34일까지는 $2.0dS \cdot m^{-1}$, 정식후 35일부터 59일까지는 $2.4dS \cdot m^{-1}$, 정식후 60일 이후에는 $2.0dS \cdot m^{-1}$ 이 되도록 관리하였다. 초기에 공급한 배양액량(120L)의 20% 정도가 감소될 때마다 배양액을 보충하였으며, 정식후 35일과 60일째에는 배양액을 전량 교체하였다.

급배액 용기내 순환배양액의 EC와 pH는 EC 미터(DCM-10, DIK Co. Ltd., Korea)와 pH 미터((DPM-10, DIK Co. Ltd., Korea)를 이용하여 배양액 보충 전후에 측정하였다. 순환배양액의 무기양분 농도 변화를 측정하기 위하여 배양액 시료를 채취하여 분석하였는데, 배양액내의 질소는 켈달 증류법(Kjeltec 2300 Analyzer Unit, FOSS), 칼륨과 칼슘은 ICP 분광법(Integra XL, GBC Scientific Equipment Pty. Ltd.), 그리고 인산

Table 1. Composition of nutrient solutions used this experiment.

Nutrient solution composition ²	Macro-element concentration (me L ⁻¹)						
	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
NHRS (all crops)	16	1.3	4	8	8	4	4
Yamasaki (cucumber)	13	1	3	6	7	4	4
PBG (cucumber, closed)	12	1	3	6.5	5.5	2	2
NIHHS (cucumber, closed)							
Till 59 DAT ³	15	1.3	4	8	7	4	4
Starting 60 DAT	12	1	3	6	6	3	3

²NHRS; National Horticultural Research Station in Japan, PBG; Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente in the Netherlands (Research Station for Floriculture and Glass Vegetables), NIHHS; National Institute of Horticultural and Herbal Science in Korea.

³DAT; days after transplanting.

은 바나도몰리브덴 산법(Genesys 2, Thermo Fisher Scientific Inc.)을 이용하여 정량분석하였다.

각 처리구별로 시험이 종료된 시점에 초장, 엽수, 엽면적을 측정하고 다음, 70°C의 온도로 유지되는 건조기에 넣어 무게 변화가 없을 때까지 건조시킨 후 건물중을 측정하였다. 수량 조사는 7월 1일부터 8월 7일까지 실시하였으며, 오이 과실은 길이가 25cm 정도 되었을 때 수확하여 과장, 과경 및 과중을 측정하였다.

결과 및 고찰

네 가지 배양액조성, 즉 일본 원시 배양액, 야마자키 배양액, PBG 배양액 및 원예원 배양액을 사용하여 오이를 재배하였을 때 순환배양액의 EC와 pH 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 모든 처리에서 순환배양액의 EC는 배양액을 보충하거나 전량 교체하였을 때 일시적으로 낮아지기는 하였으나 정식후일수가 경과됨에 따라 증가되는 경향을 나타내었는데(Fig. 1A), 그 원인은 계속적으로 배양액을 재순환하였기 때문이다(Savvas, 2002; Savvas와 Manos, 1999; Stanghellini 등, 1998). Choi 등(2001)은 순환식 고품배지재배에서 배양액이 순환되는 동안 작물의 생육단계에 따라 근권내 무기양분 중의 일부 이온들은 빠르게 소모되고 일부 이온들은 배지 내에 집적되기 때문에 순환배양액의 EC와 pH가 심하게 변한다고 하였으며, Benoit(1992)와

Böhme(1995)은 축적되기 쉬운 이온인 $\text{SO}_4\text{-S}$, Na^+ , Cl^- 등은 순환배양액의 EC를 높이는 주요인이 된다고 보고하였다.

EC 변화와는 달리 순환배양액의 pH는 계속적으로 감소되는 경향을 나타내었으며, 특히 과실수확 개시후 2~4주에 해당되는 정식후 55~66일경에는 더욱 급격히 저하되었다(Fig. 1B). Roh 등(2008)이 오이 순환식 수경재배시 배양액농도에 따른 pH 변화에 대해 보고한 바와 같이, 이러한 pH 저하는 생육단계에 따른 오이의 양분흡수 특성에 기인한 것으로서 왕성한 생식생장으로 인한 K^+ 의 흡수 증가와 그에 따른 근권으로의 H^+ 의 배출 증가에 의한 것이다.

Ishihara 등(2006)은 근권내 배양액의 $\text{NO}_3\text{-N}$, Ca^{2+} 및 Mg^{2+} 농도는 근권내 배양액의 EC와 유사한 변화 추이를 나타낸다고 보고하였는데 본 시험에서도 동일한 경향을 나타내었다(Fig. 2). 순환배양액내 $\text{NO}_3\text{-N}$, Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 $\text{SO}_4\text{-S}$ 의 농도는 배양액조성에 관계없이 정식후일수가 진전됨에 따라 계속적으로 증가되는 경향을 보였다(Fig. 2A, 2E, 2F 및 2G). 한편, $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도는 배양액을 전량 교체한 시점인 정식후 35일과 60일에 가장 높고 그 후에는 점차로 감소되어(Fig. 2B), $\text{NO}_3\text{-N}$, Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 $\text{SO}_4\text{-S}$ 의 농도 변화와는 상반되는 양상을 보였다. $\text{PO}_4\text{-P}$ 와 K^+ 의 농도는 과실수확이 시작된 정식후 43일부터 과실수확 최성기에 해당되는 정식후 66일까지는 계속적으로 감소하

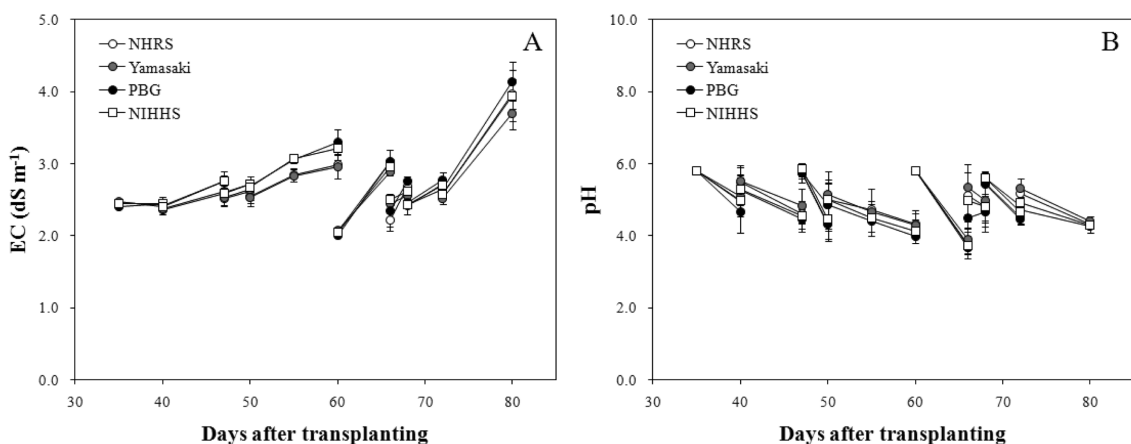


Fig. 1. Changes in the EC (A) and pH (B) of the recycled nutrient solution at different nutrient solution compositions in a closed perlite culture of cucumber. Vertical bars represent the standard deviation of a sample (n = 3). NHRS (National Horticultural Research Station in Japan), PBG (Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente in the Netherlands), and NIHHS (National Institute of Horticultural and Herbal Science in Korea).

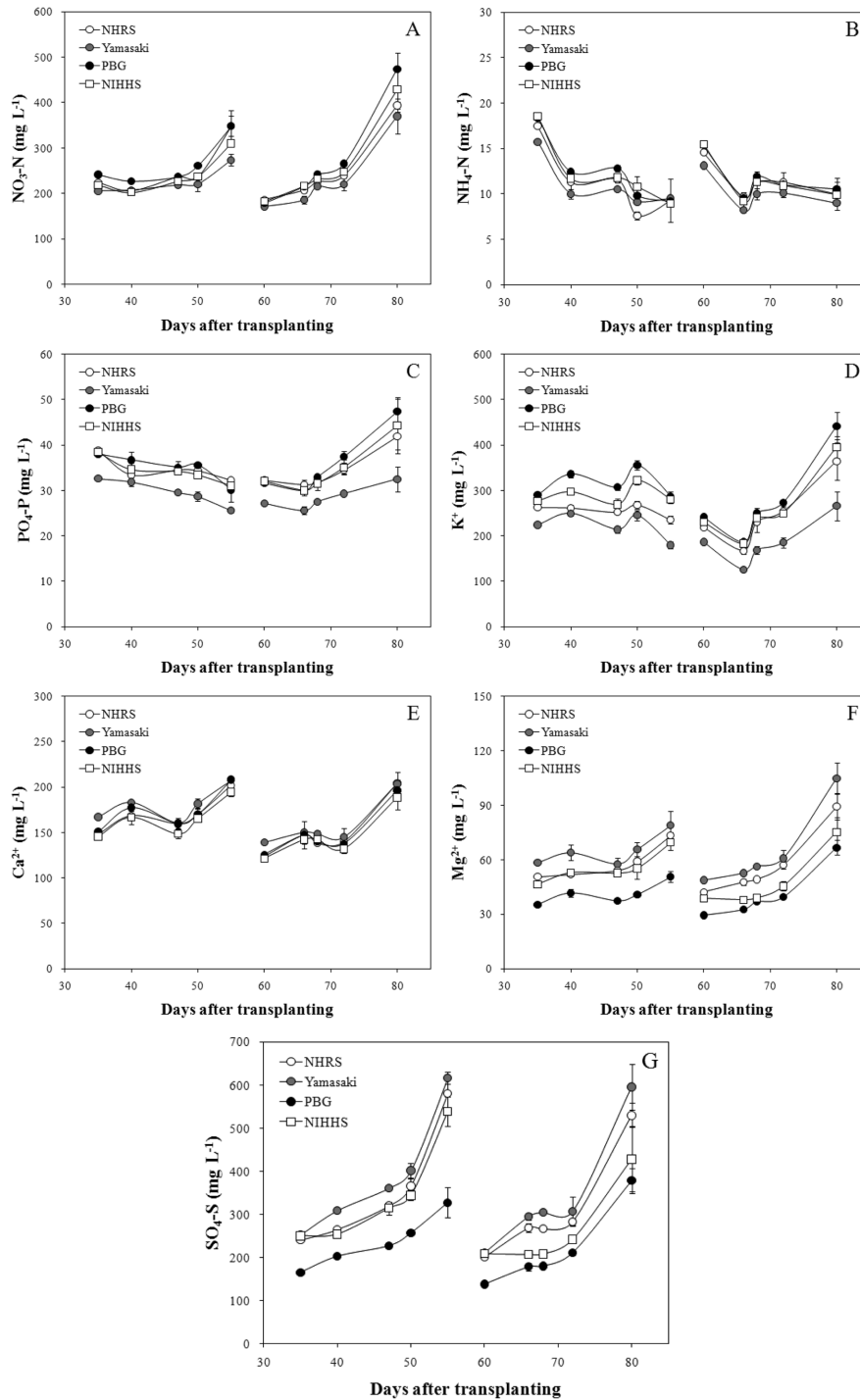


Fig. 2. Changes in the concentrations of NO₃-N (A), NH₄-N (B), PO₄-P (C), K⁺ (D), Ca²⁺ (E), Mg²⁺ (F), and SO₄-S (G) in the recycled nutrient solution at different nutrient solution compositions in a closed perlite culture of cucumber. Vertical bars represent the standard deviation of a sample (n=3). NHRS (National Horticultural Research Station in Japan), PBG (Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente in the Netherlands), and NIHHS (National Institute of Horticultural and Herbal Science in Korea).

다가, 그 후에는 점진적으로 증가하고 시험종료 시점인 정식후 80일에 가까워지면서 급격히 증가되는 경향을 나타내었다(Fig. 2C와 2D).

Bando(1991a, b)는 아마자키 배양액을 이용한 장기 수경재배 시에 과채류에서는 점차적으로 특정 성분 농도의 증가나 저하가 일어날 수 있으며, 토마토의 경우에는 NO₃-N, K⁺ 및 PO₄-P의 농도는 저하되고 Ca²⁺와 Mg²⁺의 농도는 상승한다고 하였다. Masuda 등(1989)은 일본 원시 배양액을 이용한 토마토 순환식 암면재배 시에 PO₄-P와 K⁺의 농도는 저하되고 Ca²⁺와 Mg²⁺의 농도는 상승한다고 보고하였다. 또한, Isozaki 등(2004)은 PO₄-P와 K⁺의 농도가 극단적으로 저하되면 줄기가 가늘어지고 과실수확기가 지연될 수 있다고 하였으며, Bando와 Machida(1992)는 토마토 순환식 수경재배에서는 생육중기의 배지내 PO₄-P와 K⁺의 농도 저하를 방지하기 위하여 급액하는 배양액의 PO₄-P와 K⁺의 농도를 높인 개량 배양액조성을 공급하여야 한다고 제시하였다.

따라서, 본 연구의 시험결과와 위에서 언급한 연구자들의 연구결과를 토대로, 순환배양액내 다량원소의 농도 변화 양상은 배양액조성에 관계없이 세 가지 유형, 즉 지속적 증가형(NO₃-N, Ca²⁺, Mg²⁺ 및 SO₄-S), 지속적 감소형(NH₄-N) 및 생식생장기 감소형(PO₄-P와 K⁺)으로 분류할 수 있을 것으로 판단되었으며 오이, 토마토 등을 포함한 과채류 순환식 수경재배 시에 이러한 농도 변화 유형을 고려하여 공급배양액내 무기양분 농도를 조절해 주는 것이 근권내 적정 무기양분 농도 유지 및 작물 생육 증대에 바람직할 것으로 생각되었다.

순환배양액내 무기양분 농도를 배양액조성별로 비교해 보면(Fig. 2), NO₃-N, NH₄-N 및 Ca²⁺의 농도는

배양액조성 간에 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나, 아마자키 배양액을 이용한 오이 순환식 수경재배 시에 다른 세 가지 배양액조성에 비하여 PO₄-P와 K⁺의 농도는 가장 낮아지고 Mg²⁺와 SO₄의 농도는 가장 높아지는 결과를 나타내었다. PO₄-P의 농도는 과실수확기로 접어들면서부터 Sonneveld와 Straver(1992)가 제시한 근권내 적정농도인 28mg · L⁻¹보다도 낮게 유지되었으며 K⁺의 농도는 재배기간 내내 근권내 적정농도인 313mg · L⁻¹보다 훨씬 낮은 수치를 나타내었다. 한편, 순환식 수경재배시 특히 배양액내 축적이 문제시 되는 SO₄-S의 농도는 PBG 배양액조성 처리에서 전재배기간 동안 가장 낮았고 원예원 배양액조성 처리에서는 정식후 60일부터 농도를 낮춘 조성(Table 1)으로 관리함으로써 PBG 배양액조성에 근접하는 결과를 보였다.

배양액조성을 달리하여 오이를 순환식으로 수경재배 하였을 때, 엽수를 제외한 작물 생육은 배양액조성 간에 유의한 차이를 보이지 않았는데(Table 2), 이러한 결과는 정식후 35일, 즉 영양생장이 어느 정도 진행된 상태에서 처리가 개시되었기 때문이라 생각된다. 오이의 주당 과수와 과실수량은 아마자키 배양액조성 처리에서 가장 적었으며 나머지 세 가지 배양액조성 간에는 큰 차이를 나타내지 않았다(Table 3). 아마자키 배양액을 이용한 오이 순환식 수경재배에서 과실수량이 가장 감소된 것은 다른 처리에 비하여 과실수확기 동안 PO₄-P와 K⁺의 농도가 근권내 적정농도보다 훨씬 낮은 농도로 유지됨으로써(Fig. 2), 이들 무기성분들이 과실생육에 필요한 만큼 공급되지 않았기 때문이라 생각된다.

이상의 결과를 토대로, 오이 순환식 수경재배시 순환배양액내 다량원소의 농도는 배양액조성에 관계없이

Table 2. Growth responses of cucumber plants grown at different nutrient solution compositions in a closed perlite culture 82 days after transplanting.

Nutrient solution composition ²	Plant height (cm)	Leaf number (no./plant)	Top dry wt. (g/plant)	Leaf area (cm ² /plant)
NHRS	696 a ³	58 a	119.7 a	26,607 a
Yamasaki	696 a	55 ab	114.8 a	27,078 a
PBG	692 a	54 b	119.5 a	27,245 a
NIHHS	703 a	58 a	120.6 a	27,263 a

²NHRS; National Horticultural Research Station in Japan, PBG; Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente in the Netherlands (Research Station for Floriculture and Glass Vegetables), NIHHS; National Institute of Horticultural and Herbal Science in Korea.

³Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at P < 0.05.

Table 3. Yield responses of cucumber plants grown at different nutrient solution compositions in a closed perlite culture harvested from 43 to 82 days after transplanting.

Nutrient solution composition ^z	Fruit number (no./plant)	Fruit length (cm)	Fruit diameter (mm)	Fruit yield (g/plant)
NHRS	8.6 ab ^y	25.6 a	31.9 a	1,801 ab
Yamasaki	8.3 b	25.2 a	33.0 a	1,662 b
PBG	9.3 ab	25.3 a	31.7 a	1,946 ab
NIHHS	9.6 a	25.9 a	33.8 a	2,026 a

^zNHRS; National Horticultural Research Station in Japan, PBG; Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente in the Netherlands (Research Station for Floriculture and Glass Vegetables), NIHHS; National Institute of Horticultural and Herbal Science in Korea.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P < 0.05$.

주로 영양생장이나 생식생장 등의 작물 생육특성에 기 인하여 변화된다는 것을 알 수 있었다. 또한, 아마자키 배양액을 이용하여 순환식 수경재배방식으로 오이를 재 배할 경우, 과실수확기 동안 순환배양액내 또는 근권내 PO₄-P와 K⁺의 농도를 적정범위 수준으로 유지할 수 있도록 이들 무기양분의 공급량을 증가시켜야 할 것으 로 판단되었다.

적 요

본 시험은 순환식 수경재배시 배양액조성이 배양액 내 다량원소 농도의 변화 및 오이 생육에 미치는 영 향을 구명하고자 수행되었다. 네 가지 배양액조성, 즉 일본 원시 배양액, 아마자키 오이 배양액, PBG 오이 순환식 배양액 및 원예원 오이 순환식 배양액이 급액 되는 순환식 펄라이트 수경재배시스템에서 오이(‘조은 백다다기’ 품종)를 재배하였다. 네 가지 배양액조성 처 리구 모두에서 순환배양액내 NO₃-N, Ca²⁺, Mg²⁺ 및 SO₄-S의 농도는 정식후일수가 진전됨에 따라 증가되었 고 NH₄-N의 농도는 점차적으로 감소되었다. 순환배양 액내 PO₄-P와 K⁺의 농도는 과실수확 개시기부터 과실 수확 최성기까지 계속적으로 감소되었다. 순환배양액내 NO₃-N, NH₄-N 및 Ca²⁺의 농도는 배양액조성 간에 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나, 아마자키 배양액 을 이용한 오이 순환식 수경재배 시에 다른 세 가지 배양액조성에 비하여 PO₄-P와 K⁺의 농도는 가장 낮아 지고 Mg²⁺와 SO₄²⁻의 농도는 가장 높아지는 결과를 나타내었다. 엽수를 제외한 작물 생육은 배양액조성 간 에 유의한 차이를 보이지 않았다. 그러나, 오이의 과수 와 과실수량은 아마자키 배양액조성 처리에서 가장 적 었는데, 그것은 순환배양액내 PO₄-P와 K⁺의 농도가

낮게 유지되었기 때문이다.

주제어 : 무기양분 비율, 배액, 배양액 재순환, 수경재배

인 용 문 헌

- Bando, K. 1991a. Recirculating rockwool culture of tomato [1]. Agr. Hort. 66:61-66 (in Japanese).
- Bando, K. 1991b. Recirculating rockwool culture of tomato [2]. Agr. Hort. 66:68-72 (in Japanese).
- Bando, K. and H. Machida. 1992. Establishment of the productive techniques of rock wool culuture on toma-toes IV. Effect of nutrient solution compositions on the quality and yield in circular solution system. Bull. Tokushima Agric. Exp. Stn. 28:35-42 (in Japanese).
- Bando, K., H. Machida, and H. Kodo. 1988. Establish-ment of the productive techniques of rock wool cul-ture on tomatoes . Effect of nutrient concentration on the quality and yield of tomato in circular solution cul-ture. Bull. Tokushima Agric. Exp. Stn. 25:27-35 (in Japanese).
- Benoit, F. 1992. Practical guide for simple soilless cul-ture techniques. European Vegetable R & D Center, Belgium, pp. 28-37.
- Böhme, M. 1995. Effects of closed system in sub-strate culture for vegetable production in greenhouses. Acta Hort. 396:45-54.
- Choi, E.Y., H.J. Lee, and Y.B. Lee. 2001. Mineral ele-ments control of the nutrient solution in perlite culture of cucumber. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 42:497-500 (in Korean).
- Ishihara, Y., H. Hitomi, and Y. Yamaki. 2006. Effect of nutrient composition used in the closed hydroponics system with capillary uptake method on nutrient ele-ment concentrations in the organic substrates and yield of tomato. Hort. Res. (Japan) 5:265-270 (in Japanese).
- Isozaki, M., N. Konishi, M. Kuroki, Y. Nomura, and K. Tanaka. 2004. Growth of tomato plants and changes in nutrient element concentrations in the rockwool sys-

- tem with a device to recycle used nutrient solutions. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 73:354-363 (in Japanese).
10. 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 (in Japanese).
 11. Roh, M.Y., W.S. Kim, Y.H. Choi, and Y.B. Lee. 2008. Water uptake, growth and yield response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to nutrient solution concentration in closed hydroponic systems. Hort. Environ. Biotechnol. 49:78-84.
 12. Roh, M.Y., Y.B. Lee, H.S. Kim, K.B. Lee, and J.H. Bae. 1997. Development of nutrient solution suitable for close system in substrate culture of cucumber. J. Bio. Fac. Env. 6:1-14 (in Korean).
 13. Sasaki, K. and I. Toshitaka. 1978. Study on the establishment of hydroponic techniques on fruit vegetables IV. Effect of nutrient solution concentration on growth and yield of tomato. Bull. Kanagawa Hort. Exp. Stn. 25:52-58 (in Japanese).
 14. Savvas, D. 2002. Nutrient solution recycling, pp. 299-343. In: D. Savvas and H. Passam (eds.). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo publications, Athens, Greece.
 15. Savvas, D. and G. Manos. 1999. Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems. J. Agric. Engng Res. 73:29-33.
 16. Sonneveld, C. 1981. Items for application of macroelements in soilless culture. Acta Hort. 126:187-195.
 17. 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.
 18. Sonneveld, C. and N. Straver. 1992. Voedingsoplossingen voor groenten en bloemen geteeld in water of substraten (Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates). Voedingsoplossingen glastuinbouw, No. 8, p. 15.
 19. Stanghellini, C., W.Th.M. Van Meurs, F. Corver, E. Van Dullemen, and L. Simonse. 1998. Combined effect of climate and concentration of the nutrient solution on a greenhouse tomato crop. II. Yield quantity and quality. Acta Hort. 458:231-237.
 20. Yamashita, F. and G. Hayashi. 1997. Studies on the year-round production system of tomatoes in water culture iV. Effects of the nutrient solution prescription, density and quality of supply in the circulation system. Res. Bull. Aichi Agric. Res. Ctr. 29:103-110 (in Japanese).
 21. Yamasaki, K. 1984. Hydroponic culture. Hakuyu-Sya, Tokyo, pp. 34-55 (in Japanese).
 22. 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.