

양액의 순환주기가 담액수경 엽채류의 용존산소 농도, 생육 및 식물영양소의 함량에 미치는 영향

서태철¹ · 이한철¹ · 노미영¹ · 최경이¹ · 윤형권² · 전창후^{3*}

¹국립원예특작과학원 시설원예시험장, ²국립원예특작과학원 채소과, ³서울대학교 식물생산과학부

Effect of Circulation Cycle of Nutrient Solution on the Dissolved Oxygen Concentration, and the Growth and Phytonutrient Contents of Leafy Vegetables Grown in DFT Systems

Tae Cheol Seo¹, Han Cheol Rhee¹, Mi Young Rho¹, Kyeong Lee Choi¹,
Hyung Kwon Yun², and Changhoo Chun^{3*}

¹Protected Horticulture Research Station, NIHHS, RDA, Busan 618-800, Korea

²Vegetable Research Division, NIHHS, RDA, Suwon 440-706, Korea

³Department of Plant Science and Research Institute for Agricultural Life Sciences,
Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

Abstract. To determine the effects of circulation frequency of nutrient solution, three frequencies of 10min. on/10min. off; 10min. on/110min. off; and 10min. on/1,430min. off. treatments were applied to leafy vegetable production using deep flow technique (DFT) systems and their growth and phytonutrient content were investigated. In the 10min. on/1,430min. off treatment, dissolved oxygen concentration (DOC) 17 days after treatment decreased to $2.8\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, known to be a low DOC that causes hypoxia, and thereafter decreased to $1.5\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 20 days after treatment. Fresh weight of 7 leafy vegetables in the 10min. on/1,430min. off treatment was lower by 0~24% than those in the 10min. on/110min. off treatment, and those in the 10min. on/10min. off was higher by -2~34% than those in the 10min. on/110min. off treatment as control. As the more frequent circulation was applied, the higher phosphorous content and the lower carbon to nitrogen ratio (C/N ratio) and total ascorbic acid contents were resulted. Results indicate that the circulation frequency of 10min. on/110min. off could be recommended for the production of the tested leafy vegetables in DFT systems.

Key words : circulation frequency, dissolved oxygen, leafy vegetables, phytonutrients

서 론

수경재배는 다양한 방식으로 이루어지며 담액수경 (DFT, deep flow technique), 박막수경(NFT, nutrient film technique), 고행배지경, 모관수경 등으로 분류하고 있다(Sakamoto, 1998). 담액수경은 박막수경이나 분무수경 등에 비해 다량의 배양액을 이용하므로 시설 내 기온의 변화에 따른 양액의 온도 변화가 둔감한 장점이 있다(Son, 1999). 그러나 뿌리가 수중에 담겨

져 있는 상태에서 재배하는 방식이므로 양액의 순환이 지연되거나 양액의 온도가 높아질 경우, 식물 뿌리의 호흡에 필요한 용존산소가 적정수준 이하로 낮아질 수가 있다(Park과 Kim, 1998). 이렇게 될 경우에 뿌리의 생육 및 양수분 흡수 저하로 인한 증산과 광합성 작용이 억제되어 생육이 지연된다(Atwell 등, 1990; Guo 등, 1997; Morard 등, 2000; 2004). 이러한 경우에는 베드 내 양액의 수위를 조절하는 방법이나 인위적으로 장치를 이용하여 용존산소 농도를 높이는 방법(Morimoto 등, 1989; Seo 등, 2002; Yoshida 등, 1997) 등이 있지만 번거롭고 비용이 많이 소요된다. 좀 더 쉬운 방법으로는 양액을 자주 순환시키는 방법

*Corresponding author: changhoo@snu.ac.kr
Received June 5, 2009; Revised June 17, 2009;
Accepted June 22, 2009

양액의 순환주기가 담액수경 엽채류의 용존산소 농도, 생육 및 식물영양소의 함량에 미치는 영향

(Chun과 Lee, 1991; Masuda 등, 1990)이 있다. 이 방법은 외부의 공기가 물속에 녹아 들어가서 용존산소를 높일 뿐 아니라 양액을 순환시킴으로써 순환되는 양액과 뿌리가 자주 접촉할 수 있는 기회를 부여할 수 있다. 그러나 자주 순환시키면 순환펌프의 구동 비용이 높아지므로 적절하게 조절하는 것이 경제적이다.

따라서 본 연구는 담액수경으로 엽채류를 재배할 때 양액의 순환주기에 따른 용존산소 농도의 변화를 검토하고 생육, 무기양분 흡수, 그리고 비타민C 함량에 미치는 효과를 검토하여 수경재배 엽채류의 안정생산을 위한 기초자료를 얻고자 하였다.

재료 및 방법

본 실험은 5월 3일부터 5월 27일까지 원예연구소 유리온실에서 수행되었다. 실험 재료는 Table 1과 같다. DFT 시스템은 길이 3.4m, 폭 0.9m, 높이 0.9m, 그리고 베드 깊이 10cm의 스테인레스 재질의 베드 아래에 약 450L의 FRP 양액 탱크와 1/4HP 양액 순환펌프가 부착된 일체형 시스템으로 구성하였다. 배양액은 원시배양액 0.5배액으로 조성하였는데 양액의 최초 공급농도는 EC 1.4~1.5dS · m⁻¹였으며, pH는 7.2~7.3 범위였다. 정식하기 전에 용존산소 측정 시스템(OxyGuard 8, (주)명선해양산업, 한국)을 설치하였으며, 시운전을 하여 표시 값이 안정적으로 측정되는 것을 확인한 후 사용하였다. 유리온실에서 162공 플러그 용

기에서 30일간 육묘한 묘의 근권부를 흰색 부직포로 싸서 베드에 정식하였다. 이 후 처리 기간 중의 배양액 내 용존산소 농도를 모니터링을 하였으며, 재배 기간 중 배양액의 pH, EC는 휴대용 pH 측정기(HM-14P, TOA, Japan)와 EC 측정기(CM-14P, TOA, Japan)로 오전 9~10시경에 측정을 하였다. 양액 순환주기 처리는 Table 2와 같이 10분 간격 24시간 타이머를 이용하여 양액 순환펌프의 작동을 조절하였다. 실험구는 2반복으로 완전임의 배치하였다.

정식 20일 후에 생육조사를 하였고 생육조사한 시료를 건조기에 넣어 건조한 후 C, N 분석과 식물체 무기성분 분석에 이용하였다. C/N율은 건조 시료 0.2g을 평량하여 CNS 분석기(CNS-2000, Reco, USA)로 분석하였으며, 식물체 무기 성분은 식물체 시료 0.5g을 유리 삼각 플라스크에 평량하여 넣고 흙 후드 내의 가열판 위에서 분해액인 ternary solution(HNO₃:HClO₄:H₂SO₄, 10:4:1, v/v) 10mL를 넣어 습식 분해하여 냉각시킨 후, 플라스크 안의 분해된 시료를 50~70°C 정도의 증류수로 씻어 100mL로 정량한 다음, P는 vanadate법으로 비색계(Lambda 18, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 각각 측정하였고, 양이온들은 원자흡광분광광도계(Model 3300, Perkin Elmer, USA)로 분석하였다.

총 비타민 C 함량을 분석하기 위해 정식 23일 후에 처리구와 작물별 1주씩 식물체를 채취하였다. 잘게 썬 잎 조직 0.5g을 3반복으로 50mL 플라스틱 용기에

Table 1. Plant materials used in this experiment.

Genus	Species	Englishname and cultivar
Chenopodiaceae	<i>Spinacia Oleracea</i> L.	Spinach 'Banchuparuk'
	<i>Beta vulgaris</i> L.	Swiss chard 'Rubired'
Compositae	<i>Lactuca sativa</i> L.	Leaf lettuce 'Hanbatcheongchima'
	<i>Chrysanthemum coronarium</i> L.	Edible chrysanthemum 'Jungyeopssukgat'
	<i>Cichorium intybus</i> L.	Chicory 'Nonguchicory'
	<i>Cichorium endivia</i> L.	Endive 'Jungyeopendive'
Cruciferae	<i>Brassica rapa</i> L.	Pak-choi 'Seoulcheonggyeongchae'

Table 2. Explanation of the circulation frequency treatment.

Treatment	Circulated min per day	Description
T1	720minutes (10min. × 72times/day)	On/off 10/10min.
T2	120minutes (10min. × 12times/day)	On/off 10/110min.
T3	10minutes (10min. × 1time/day)	On/off 10/1,430min.

평량하여 넣고 2.5% meta-phosphoric acid 용액 25mL를 넣은 후 균질기로 균질하였다. 균질된 시료를 원심분리용 튜브에 넣고 원심분리기 4°C, 10,000g, 조건으로 10분간 원심 분리하였다. 상정액을 0.45 PVDF μ m filter(Whatman)로 여과하여 HPLC용 샘플 병에 담았다. 분석은 HPLC(Breeze system, Waters, USA)로 하였으며, 분석 조건은 symmetry C18(5 μ m, 3.9 \times 150mm) 컬럼(W12191L-028, Waters, USA), 파장 254nm, 유속 0.5mL \cdot min⁻¹, 전개 용매는 20 μ M KH₂PO₄액과 메탄올(90:10, v/v)로 하였다. KH₂PO₄액은 H₃PO₄로 pH를 2.8로 맞추어 진공 펌프에 FP-Verticel™ membrane filter(FP-450, PALL, USA)로 여과한 후 초음파로 가스를 제거하여 사용하였다. 비타민 C 표준 용액은 100mg \cdot L⁻¹ L-ascorbic acid(A-5960, Sigma)로 하였다. 처리 효과에 대한 통계분석은 SAS 통계 프로그램(SAS 9.1)을 이용하였다.

결과 및 고찰

Fig. 1은 5월 7일부터 5월 23일까지의 양액 순환주기에 따른 용존산소 농도의 변화를 DO 모니터링 시스템으로 연속적으로 측정된 결과이다. 용존산소 농도는 재배 기간이 경과함에 따라 감소하는 양상을 나타내었고, 처리별로는 10분 순환/10분 정지 처리 구는 최고 10.0mg \cdot min⁻¹, 최저 7.5mg \cdot min⁻¹ 그리고 평균 8.7 \pm 0.54mg \cdot min⁻¹로 가장 높게 유지되었다. 10분 순

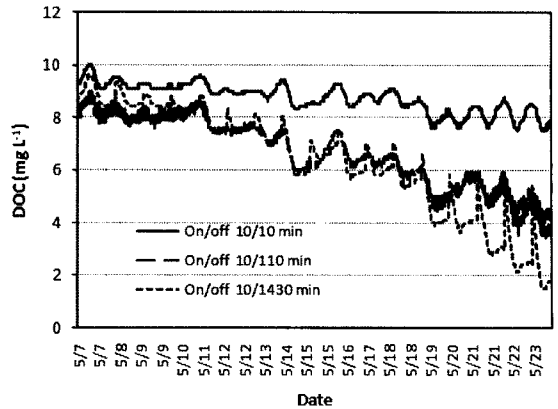


Fig. 1. Continuous changes of dissolved oxygen concentration as affected by the circulation cycle of nutrient solution during the growing period.

환/110분 정지 처리 구는 최고 9.0mg \cdot min⁻¹, 최저 3.4mg \cdot min⁻¹ 그리고 평균 6.7 \pm 1.30mg \cdot min⁻¹ 이었으며, 10분 순환/1,430분 정지 처리구는 최고 9.6mg \cdot min⁻¹, 최저 1.5mg \cdot min⁻¹ 그리고 평균 6.4 \pm 2.07mg \cdot min⁻¹로 측정되었다. 정식 후 13일부터 10분 순환/110분 정지 처리와 10분 순환/1,430분 정지 처리에서 용존산소 농도 차이가 커지기 시작했다.

모든 실험 작물에서 양액의 순환주기가 짧은 처리에서 생체중이 무거운 경향을 나타냈다. 최대 근장도 순환주기가 10분 순환/10분 정지 처리구에서 공시한 모든 작물에서 길었다(Fig. 2). 이러한 결과는 오전 9시

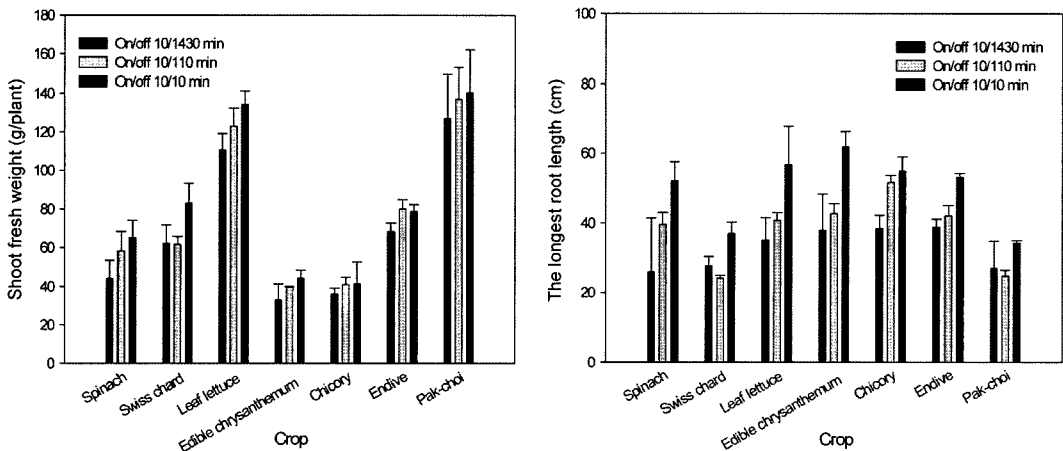


Fig. 2. Shoot fresh weight (left) and the longest root length (right) of 7 leafy vegetables grown for 20 days after transplanting in DFT systems as affected by the circulation frequency of nutrient solution.

양액의 순환주기가 담액수경 엽채류의 용존산소 농도, 생육 및 식물영양소의 함량에 미치는 영향

경에 하루에 10분만 순환한 처리구에서 처리 후 17일 이후부터는 저산소 조건(DOC $2.8\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$)에 노출 되는 시간이 점차 많아졌기 때문에 생육이 억제된 것으로 판단되었다. 또한 이것은 저산소 조건이 되면 뿌리의 길이 신장이 억제된다는 Huang 등(1997)의 보고와 일치하였다. Verslues 등(1998)은 근권의 산소에 대한 식물 뿌리의 반응은 산소의 농도와 더불어 근권의 산소 이용성과도 관련되어 있다고 하였다. 그러나 본 실험 조건에서는 하루에 10분 순환하여도 처리 후 20일 경과 시까지의 지상부와 지하부의 생육 억제가 심하지는 않았다. 이것은 N_2 를 통기하여 저산소 조건 처리에서 자란 뿌리는 해부학이나 형태적으로 침수와

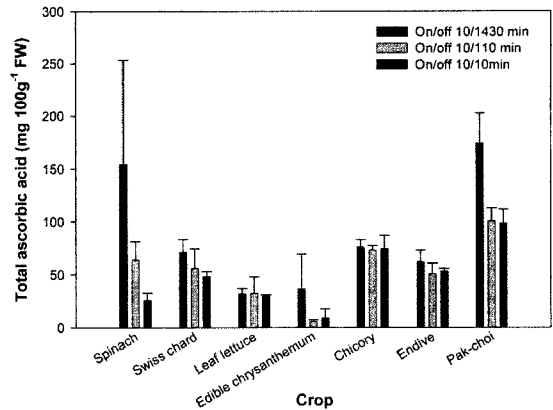


Fig. 4. Total ascorbic acid content of 7 leafy vegetables grown for 23 days after transplanting in DFT systems as affected by the circulation frequency of nutrient solution.

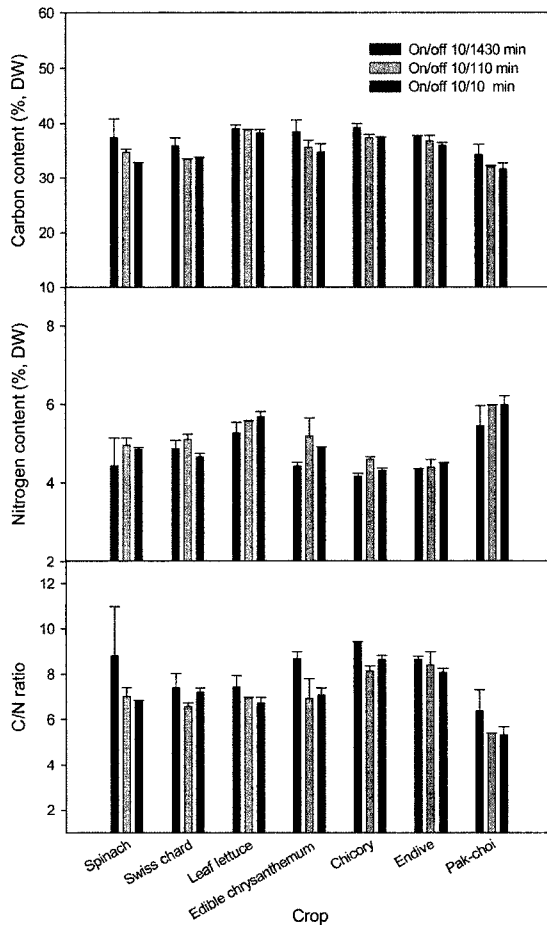


Fig. 3. Carbon and nitrogen content, and C/N ratio of 7 leafy vegetables grown for 20 days after transplanting in DFT systems as affected by the circulation frequency of nutrient solution.

같은 무통기에 의한 반응과는 다르며(Wiengweera 등, 1997), 하루 한번의 양액 순환이 산소의 이용성을 높임과 동시에 호흡에 의해 발생된 CO_2 와 저산소 조건에서 발생하는 유해한 acetaldehyde나 ethylene의 농도를 어느 정도 낮추었기 때문으로 판단되었다(Mustroph 등, 2006; Shinano 등, 2008).

식물체 건물 중의 C/N율은 양액 순환주기가 긴 처리에서 높은 경향이있지만, 통계적인 유의성은 없었다(Fig. 3). 총 비타민 C 함량은 시금치, 썬갓, 청경채에서 차이가 있었으며, 양액 순환주기 10분 순환/1,430분 정지 처리에서 높았다(Fig. 4). 비타민 C는 고등식물에서 당이 전구체가 되어 생성되는 항산화물질로 알려져 있는데(Ishikawa와 Shigeoka, 2008; Wheeler 등, 1998), 산소 부족에 의해 생성되는 활성 산소의 산화적 스트레스 억제에도 관련되어 있으나 산소 부족 스트레스 조건에서 항산화물질의 상태에 대해서는 상반된 견해가 많다(Biemelt 등, 1998; Blokhina 등, 2003). 본 실험에서 하루에 10분만 양액을 순환시킨 처리구에서 C/N율이 높은 경향을 보인 것과 관련하여 탄수화물인 당의 함량도 높았으리라 추측된다.

양액 순환주기에 따른 식물체 건물 중의 무기물 함량은 차이가 있었다(Table 3). P 함량은 모든 작물에서 10분 순환/10분 정지 처리에서 높았다. 옥수수의 경우 체내 P 함량은 근권 P의 이용성과 생장에 의한 식물체내 농도의 희석에 의해 결정되며(Chassot와 Richner, 2002), 상추의 경우 P를 결핍시키면 내생에

Table 3. Mineral contents of 7 leafy vegetables grown for 20 days after transplanting in DFT systems as affected by the circulation frequency of nutrient solution.

Crop	Circulation time (min, on/off)	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
		(% DW)				(mg kg ⁻¹ , DW)			
Spinach	10/1,430	1.12b ^c	3.40a	2.10c	0.46c	294a	303a	151a	53a
	10/110	1.28ab	3.75a	3.19b	0.78b	120a	51a	48a	17a
	10/10	1.36a	6.28a	3.57a	0.89a	146a	129a	81a	19a
Swiss chard	10/1,430	0.83b	5.83a	4.06c	0.53c	211a	139a	110a	28a
	10/110	1.04a	5.17b	5.56a	0.82b	146a	128a	73a	27a
	10/10	1.02a	4.74c	4.92b	1.03a	152a	146a	40a	20a
Leaf lettuce	10/1,430	1.60b	7.77a	2.50c	0.24b	190a	214a	132ab	22a
	10/110	2.00a	6.75a	2.94a	0.28a	234a	180a	163a	27a
	10/10	2.09a	5.67a	2.66b	0.29a	211a	151a	69b	21a
Edible chrysanthemum	10/1,430	1.13c	5.49a	3.05a	0.30c	281a	104a	84a	25a
	10/110	1.84a	5.05a	2.97a	0.37a	236a	101a	79a	21a
	10/10	1.27b	5.64a	2.88a	0.33b	197a	120a	76a	22a
Chicory	10/1,430	1.63b	6.20a	3.38a	0.20a	176a	206a	93a	20a
	10/110	2.00a	5.37a	3.78a	0.26a	176a	114a	58a	18a
	10/10	2.07a	4.92a	3.40a	0.27a	193a	96a	73a	17a
Endive	10/1,430	1.31b	5.35a	2.95a	0.28a	188a	164a	154a	32a
	10/110	1.22c	5.60a	3.15a	0.23b	246a	127a	99a	21b
	10/10	1.40a	5.57a	2.03b	0.28a	208a	99a	54a	20b
Pak-choi	10/1,430	1.27b	5.82a	7.18a	0.54a	201a	159a	85a	22a
	10/110	1.49a	4.15a	7.72a	0.59a	216a	118a	58a	25a
	10/10	1.55a	3.84a	6.99a	0.58a	155a	109a	54a	25a

^aMean separation within columns for each crop by Duncan's multiple range test, $P = 0.05$.

틸렌의 발생이 2배 이상 증가한다(Borch 등, 1999)고 한다. 또한 상추를 P의 흡수가 제한된 조건에서 재배할 경우 질산태 질소의 축적이 억제되고, 건물질이 높아지고 당과 유기산 등의 탄수화물이 증가한다는 Buwalda와 Warmenhoven(1999)의 보고와 관련이 있을 것으로 판단되었다. K 함량은 근대를 제외한 다른 작물에서 차이가 없었으며, Ca 함량은 시금치, 적근대, 상추, 엔디브에서 차이가 있었으며, Mg 함량은 시금치, 적근대, 상추, 쪽갓, 엔디브에서 차이가 있었다. 미량 원소 중 Zn 함량은 상추에서, Cu는 엔디브에서 차이가 있었다. 일반적으로 근권 무산소 또는 저산소 상태에서 무기 양분의 흡수와 관련된 많은 연구 결과에서 대부분의 무기 성분들의 감소를 가져온다고 보고되고 있다(Gutierrez-Boem 등, 1996; Morard 등, 2004; Smethurst 등, 2005; Tachibana, 1986). 본 실험에서도 생육이 많이 억제된 시금치와 근대에서 무기 성분의 차이가 큼을 알 수 있었으나 일정한 경향은 없었다. 이러한 결과는 근권부의 저산소 노출 시간이 짧고

무기성분들 간의 상호작용도 관여(Fageria, 2001; Marschner, 1995)했을 것으로 추찰된다.

이상의 결과, 담액수경재배 시 하루에 한 번의 양액 순환은 용존산소 농도를 점차적으로 감소시켜 저산소 조건을 만들어 엽채류의 생육을 억제하며 양분의 흡수를 저해하는 것을 알 수 있었다. 또한 10분마다 자주 양액을 순환시켜도 2시간에 10분 정도의 양액 순환에 비해 생육이나 양분 흡수 면에서 뚜렷한 효과가 없음을 확인할 수 있었다. 따라서 2시간에 10분 정도의 순환으로도 엽채류의 생육이나 무기양분 흡수를 억제하지 않는 용존산소 농도가 유지됨을 알 수 있었다. 그러나 엽채류 담액수경재배 시 계절에 따라서 양액의 온도가 변화되므로 이에 따른 양액 순환 효과와 용존산소 농도 효과 등에 대한 더욱 정밀한 검토가 요구된다.

적 요

주요 엽채류 7종의 주년 안정생산을 위한 담액수경

재배 시 양액의 순환주기가 양액의 용존산소 농도, 엽채류의 생육, 그리고 식물영양소의 함량에 미치는 효과를 검토한 결과, 양액을 1일 10분 순환 처리구는 정식 13일 후 용존산소 농도가 급격하게 떨어지고 17일 후에는 $2.8\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 20일 후에는 최저 $1.5\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 까지 낮아졌다. 처리 20일 후 7가지 엽채류의 생체중은 1일 10분 처리구에서는 대조구인 10분 순환/110분 정지 처리구에 비해 0~24% 범위에서 낮아졌으며, 10분 순환/10분 정지 처리구에서는 -2~34% 증가하였다. 양액의 순환주기가 짧을수록 식물체 엽내 P의 함량이 증가하였으며, 식물체의 C/N율과 비타민 C 함량은 감소하였다. 이상의 결과, 담액수경 엽채류의 안정적인 생육과 식물영양소의 흡수를 위해서 2시간에 10분 정도의 양액 순환 처리가 효율적이었다.

주제어 : 순환주기, 식물영양소, 엽채류, 용존산소

인용문헌

- Atwell, B.J. and B.T. Steer. 1990. The effect of oxygen deficiency on uptake and distribution of nutrients in maize plants. *Plant and Soil* 122:1-8.
- Biemelt, S., U. Keetman, and G. Albrecht. 1998. Reaeration following hypoxia or anoxia leads to action of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. *Plant Physiol.* 116:651-658.
- Blokhina, O., E. Virolainen, and K.V. Fagerstedt. 2003. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review. *Ann. Bot.* 91:179-194.
- Borch, K., T.J. Bouma, J.P. Lynch, and K.M. Brown. 1999. Ethylene: a regulator of root architectural responses to soil phosphorus availability. *Plant Cell Environ.* 22: 425-431.
- Buwalda, F. and M. Warmenhoven. 1999. Growth-limiting phosphate nutrition suppresses nitrate accumulation in greenhouse lettuce. *J. Expt. Bot.* 50:813-821.
- Chassot, A. and W. Richner. 2002. Root characteristics and phosphorus uptake of maize seedling in a bilayered soil. *Agron. J.* 94:118-127.
- Chun, C. and B.Y. Lee. 1991. Deep flow hydroponics culture of Chinese cabbage and the computer-based automation of nutrient circulation. *Seoul National Univ. J. Agric. Sci.* 16:25-37.
- Fageria, V.D. 2001. Nutrient interactions in crop plants. *J. Plant Nutr.* 24:1269-1290.
- Guo, S.R. and S. Tachibana. 1997. Effect of dissolved O_2 levels in a nutrient solution on the growth and mineral nutrient of tomato and cucumber seedlings. *J. Jap. Soc. Hort. Sci.* 66:331-337.
- Gutierrez-Boem, F.H., R.S. Lavado, and C.A. Porcelli. 1996. Note on the effects of winter and spring waterlogging on growth, chemical composition and yield of rapeseed. *Field Crops Res.* 47:175-179.
- Huang, B., J.W. Jonson, J.E. Box, and D.C. NeSmith. 1997. Root characteristics and hormone activity of wheat in response to hypoxia and ethylene. *Crop Sci.* 37: 812-818.
- Ishikawa, T. and S. Shigeoka. 2008. Recent advances in ascorbate biosynthesis and the physiological significance of ascorbate peroxidase in photosynthesizing organisms. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 72:1143-1154.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrient of higher plants (2nd). Academic press, London, pp.430-433.
- Masuda, M., E. Sawada, and S. Matsubara. 1990. Dissolved oxygen concentrations as affected by intermittent flow and temperature of the nutrient solution in NFT tomato culture. *J. Jap. Soc. Hort. Sci.* 59:565-572.
- Morard, P., L. Lacoste, and J. Silvestre. 2000. Effect of oxygen deficiency on uptake of water and mineral nutrients by tomato plants in soilless culture. *J. Plant Nutr.* 23:1063-1078.
- Morard, P., L. Lacoste, and J. Silvestre. 2004. Effect of oxygen deficiency on mineral nutrition of excised tomato roots. *J. Plant Nutr.* 27:613-626.
- Morimoto, T., T. Masuda, and H. Nonami. 1989. Oxygen enrichment in deep hydroponic culture improves growth of Spinach. *Environ. Control in Biol.* 27:91-102.
- Mustroph, A., E.I. Boamfa, L.J.J. Loarhoven, F.J.M Harren, G. Albrecht, and B. Grimm. 2006. Organ-specific analysis of the anaerobic primary metabolism in rice and wheat seedling; I. Dark ethanol production is dominated by the shoots. *Planta* 225:103-351.
- Park, K.W. and Y.S. Kim. 1998. Hydroponics in horticulture. Academy books, Seoul, Korea.
- Sakamoto, Y. 1998. The significance of research on the root system in hydroponics. *Root Res.* 7:113-116.
- Seo, T.C., Y.C. Kim, J.W. Lee, H.Y. Yun, and K.Y. Kim. 2002. The effect of dissolved oxygen concentration on the growth and nutrient uptake of spinach and lettuce grown hydroponically in summer season. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 43:421-424.
- Shinano, T., T. Yamamoto, K. Tawaraya, M. Tadokoro, T. Koike, and M. Osaki. 2008. Effects of elevated atmospheric CO_2 concentration on the nutrient uptake characteristics of Japanese larch (*Larix kaempferi*). *Tree Physiol.* 27:97-104.
- Smethurst, C.F., T. Garnett, and S. Shabala. 2005. Nutritional and chlorophyll fluorescence of lucerne (*Medicago sativa*) to waterlogging and subsequent recovery. *Plant and Soil* 270:31-45.

24. Son, J.E. 1999. Analyses of root-zone temperatures at various locations in NFT, DFT, and aggregate culture systems. J. Kor. Soi. Hort. Sci. 40:4-8.
25. Tachibana, S. 1986. Environmental factor and root function in nutriculture. Agri. and Hort. 61 Supplement:143-148.
26. Verslues, P.E., E.S. Ober, and R.E. Sharp. 1998. Root growth and oxygen relations at low water potentials. Impact of oxygen availability in polyethylene glycol solutions. Plant Physiol. 116:1403-1412.
27. Wiengweera, A., H. Greenway, and C.J. Thomson. 1997. The use of agar nutrient solution to simulate lack of convection in waterlogged soils. Ann. Bot. 80:115-123.
28. Wheeler, G.L., M.A. Jones, and N. Smirnov. 1998. The biosynthetic pathway of vitamin C in higher plants. Nature 393:365-368.
29. Yoshida, S., M. Kitano, and H. Eguchi. 1997. Growth of lettuce plants (*Lactuca sativa* L.) under control of dissolved O₂ concentration in hydroponics. Biotronics 26:39-45.