Journal of Practical Agriculture & Fisheries Research
Vol.19(1). 2017. pp.5-14

인공광을 이용한 수경재배에서 배양액 농도가 상추의 생장과 배양액 양분 농도에 미치는 영향

김동억[1]· 이운용[1]· 허정욱[2]· 이공인[2]· 강동현[2]· 우영회[1*]

[1]한국농수산대학, [2]국립농업과학원 농업공학부

Effects of Nutrient Solution Strength on Growth and Nutrient Element Concentrations of Leaf Lettuce by Hydroponic Culture under Artificial Light

D. E. Kim[1], W. Y. Lee[1], J. W. Heo[2], G. I. Lee[2], D. H. Kang[2], and Y. H. Woo[1*]

[1]*Korea National College of Agriculture and Fisheries, 1515, Kongjwipatjwi-ro, Wansan-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 54874, Korea*
[2]*Farming Automation Division, National Institute of Agricultural Sciences, 310, Nongsaengmyeong-ro, Wansan-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 54874, Korea*

Abstract

This study was conducted to investigate the effects of nutrient solution strength on growth and nutrient element concentrations in leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. 'Dduksum') by hydroponic culture under fluorescent lamp and LED. Leaf lettuce were grown in closed hydroponic cultivation systems supplied with 1/2, 1 and 2 strength of nutrient solution recommended by horticultural experiment station in Japan. The growth of ‘Dduksum’ was highest in the 2 strength of standard nutrient solution. The amount of nutrient element in the recycled nutrient solution was higher at 2, 1 and 1/2 strength of nutrient solution. The concentration of NO_3-N, Ca^{2+}, Mg^{2+} in the recycled nutrient solutions increased in 1 and 2 strength of nutrient solution but that of NH_4-N decreased gradually in 1/2 and 1 strength of nutrient solution. The concentration of K, Ca, Mg in leaf lettuce was maintained in the normal range, whereas the concentration of phosphorous was 1.3 to 1.6%, which was higher than proper range. As the concentration of NH_4-N decreases gradually in all the treatments, it is necessary to raise the rate of NH_4-N or add it.

Key Words : Leaf lettuce, Fluorescent lamp, LED, Closed hydroponic culture, Plant factory

1 * 교신저자 : 한국농수산대학 wooyh612@korea.kr

2 본 논문은 2014년 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술개발 연구비 지원으로 수행된 것임.

Ⅰ. 서론

식물공장은 환경조절을 통해서 작물의 주년 생산과 계획생산이 가능하며, 작물의 수량과 품질을 조절할 수 있는 공장형 식물생산시스템이다. 즉, 주년 재배, 계획생산, 수량 및 품질 관리를 통하여 재배면적당 생산량의 극대화, 노동력 절감을 도모할 수 있는 새로운 개념의 농법이다(Choi et al., 2012).

식물공장 생산시스템에서 수경재배방식을 채택하고 있다. 따라서 지하부 환경인 배양액 관리가 중요하다. 식물공장의 정상적인 운영을 위해서는 작물의 최적 배양액 관리 자동화 시스템 개발이 우선되어야 한다(Lee et al., 2000). 양액재배에서 고려해야 할 문제는 근권의 환경관리인데, 그 중에서도 가장 중요한 문제는 배양액의 관리이다(조 등, 1994). 특히, 순환식 수경재배에서 양액 내 개별 이온 간의 비율은 해당 작물의 생육에 영향을 주기 때문에 안정적인 작물 재배를 위해서는 배액 재사용에서 양액 내 이온의 균형을 일정하게 유지하는 관리기술이 요구된다(조 등, 2016).

양액 내 무기성분의 농도와 균형은 수경재배 시 작물 생육 및 품질에 큰 영향을 미친다(Yamasaki, 1982). 따라서 순환식 수경재배에서는 배양액의 주기적 분석을 통해 사전에 장해요인을 제거하고 최적의 근권 이온 함량을 유지하도록 해야 한다.

일반적으로 작물은 생육단계, 기상환경 변화, 근권부 환경 및 품종 등에 따라 양분과 흡수 특성이 다르며, 그로 인하여 순환식 양액재배법의 경우 공급하는 양액의 무기이온 조성비가 변화되어 Ca^{2+} 및 SO_4^{2-} 등 일부 이온의 집적이 일어나는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2000). Kang and Kim(2007)은 수경재배에서 배양액의 최적 조성 및 농도는 작물의 종류, 환경조건, 작형 또는 배양액의 공급방법 등에 따라 달라지기 때문에 관련된 연구가 수행되어야 식물공장에 적용할 수 있다고 하였다. 인공광 식물공장은 인공적으로 만든 빛을 이용하여 작물을 재배하기 때문에 광도와 파장은 물론 온, 습도 변화의 패턴이 전 생육 기간 동안 유사하다. 따라서 순환되는 양액의 변화를 알고 이를 재조성하여 사용하면 양액의 무기이온 조성비를 안정화할 수 있다.

따라서, 본 연구는 식물공장의 순환식 수경재배에 적합한 배양액 개발에 앞서 인공광을 이용한 수경재배에서 배양액 농도에 따른 적축면 상추 생육과 무기이온 흡수 그리고 양액 내 무기 이온 함량 변화를 고찰하기 위한 기초자료로 활용하고자 수행하였다.

Ⅱ. 재료 및 방법

실험재료로는 뚝섬 적축면(*Lactuca sativa* L. cv. 'Dduksum') 상추(동부하이텍)를 사용하였다. 200구 육묘트레이에 적축면 상추를 파종하여 광합성 유효광량자속밀도가 120μmol $m^{-2}\cdot s^{-1}$±20, 조사시간이 12시간으로 조절된 육묘장치에서 3주간 육묘하였다. 정식 전 뿌리세척과 스펀지작업 후 2일 동안 육묘장치에 두었다 이식하였다. 형광등과 LED의 광도는 100μmol $m^{-2}\cdot s^{-1}$±20로 조절하였으며, 일장은 12시간 명기와 12시간 암기로 설정하였다. 온도는 주야간 각각 23.9±0.2℃/20.0±0.2℃로, 습도는 60~70%로 유지하면서 담액수경방식으로 4주간 재배하였다. 광원은 형광등과 LED 두 종류이었으며, LED 조합비율은 적색:청색=3:1로 하였다. 광량자속밀도는 광량자센서(LI-190SA, Li-Cor Inc., USA)를 연결한 광측정기(LI-250, Li-Cor Inc., USA)를 이용하여 측정하였다.

배양액은 일본 야채다업시험장 표준배양액(NO_3-N 16.0, NH_4-N 1.3, PO_4-P 4.0, K 8.0, Ca 8.0 Mg 4.0 me·L^{-1})의 1/2배액, 1배액 및 2

배액 3수준의 처리를 하였으며, 일주일마다 줄어든 양만큼 배양액을 보충하였다. 재배방식은 담액수경(Deep flow technique; DFT)방식으로 하였다. 정식 후 1주일 간격으로 배양액을 채취하여 분석하였으며, 수확 후 생육조사, 식물체 분석을 실시하였다.

배양액의 EC와 pH는 2~3일 간격으로 측정하였고, 정식 후 7일 간격으로 엽수, 엽장, 엽폭을 조사하였다. 정식 후 28일째 수확하여 지상부 생체중과 건물 중, 지하부 생체중과 건물중 그리고 엽록소 함량을 조사하였다. 배양액의 양수분 흡수율은 Yamasaki (1981) 방식에 의해 산정하였다. 건물중은 65℃에서 72시간 건조된 후의 무게를 측정하였다. 통계분석은 SAS 프로그램(SAS 9.2, SAS Institute Inc., USA)을 이용하여 Duncan's multiple range test(DMRT)를 실시하여 5% 유의수준에서 각 처리간 차이의 유의성을 검정하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

인공광을 이용한 적축면 상추 수경재배에서 배양액 농도에 따른 생육과 무기이온 흡수특성을 조사하기 위하여 일본 원시양액 3농도 처리(1/2배액, 1배액, 2배액)를 하여 적축면 상추를 재배하였다. 그 결과, 형광등 하에서 재배된 적축면 상추의 정식 28일째 지하부 생육은 배양액농도 간에 유의한 차이가 나타나지 않았으나 지상부 생육에서는 차이가 나타났다. 2배액 처리구 에서의 지상부 생체중 및 엽장, 엽수는 1/2배액, 1배액 처리구 보다 유의하게 높게 나타났다. 2배액 처리구에서의 지상부 생체중은 1배액에 비해 약 33%, 엽장은 약 18%, 엽수는 약 21% 높아 양액 농도가 진할수록 생육이 좋은 것으로 나타났다(Fig. 1).

이는 Park et al.(1999)의 식물공장내에서 인공광의 광도가 높으면 배양액의 농도가 낮은 편이 좋고 광도가 낮으면 배양액의 농도가 높은 것이 생육이 좋다고 보고한 결과와 동일한 경향을 보였다. 또한, 박 등(1998)은 잎상추 수경재배에서 근권 EC가 1.2dS/m이상에서 거의 비슷한 생육량을 나타냈으며, EC 1.2~1.6dS/m에서 가장 높은 건물중과 생체중을 나타냈다고 하였다.

LED 하에서 재배된 적축면 상추의 정식 28일째 적축면 상추의 초장, 건물 중에서는 배양액 농도 처리구(1/2배액, 1배액, 2배액) 간에 유의한 차이가 나타나지 않았다. 그러나 2배액, 1배액 처리구에서의 지상부와 지하부 생체중은 1/2배액 처리구에 비해 유의하게 증가하였으며, 1/2배액 처리구 대비 지상부 생체중, 지하부 생체중은 각각 약 42%, 30% 증가하는 것으로 나타났다. Cha et al.(2012)이 배양액 농도 0.5, 1.0, 1.5dS/m 수준에서 생육한 적축면 상추의 생체중과 건물중은 배양액 농도와 광도가 낮아짐에 따라 감소하였다는 보고와 같이 LED 하에서 재배된 적축면 상추의 생육도 형광등 하에서 재배된 상추의 생육과 같이 2배액 처리구에서 생육이 가장 좋은 것으로 나타났다(Fig. 2).

형광등과 LED 광조건 하에서 처리농도에 따른 EC 변화를 보면(Fig. 3), 1/2배액 처리일 때 형광등에서는 정식 후 14일에 증가하였으나 그 후 처음 수준의 값을 나타내었으며, LED에서는 감소하는 경향이었다. 1배액 처리일 때 형광등에서는 EC가 다소 증가하는 경향을 보인 반면 LED에서는 2dS.m^{-1} 내외에서 비교적 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다. 2배액 처리에서는 두 광조건 모두에서 EC가 상승하는 경향을 보였다. Roh et al.(2009)은 오이 순환식 수경재배 시 순환 배양액의 EC는 배양액을 보충하거나 전량 교체하였을 때 일시적으로 낮아지기는 하나 정식 후 일수가 경과됨에 따라 증가되는 경향을 나타내었다고 하였다.

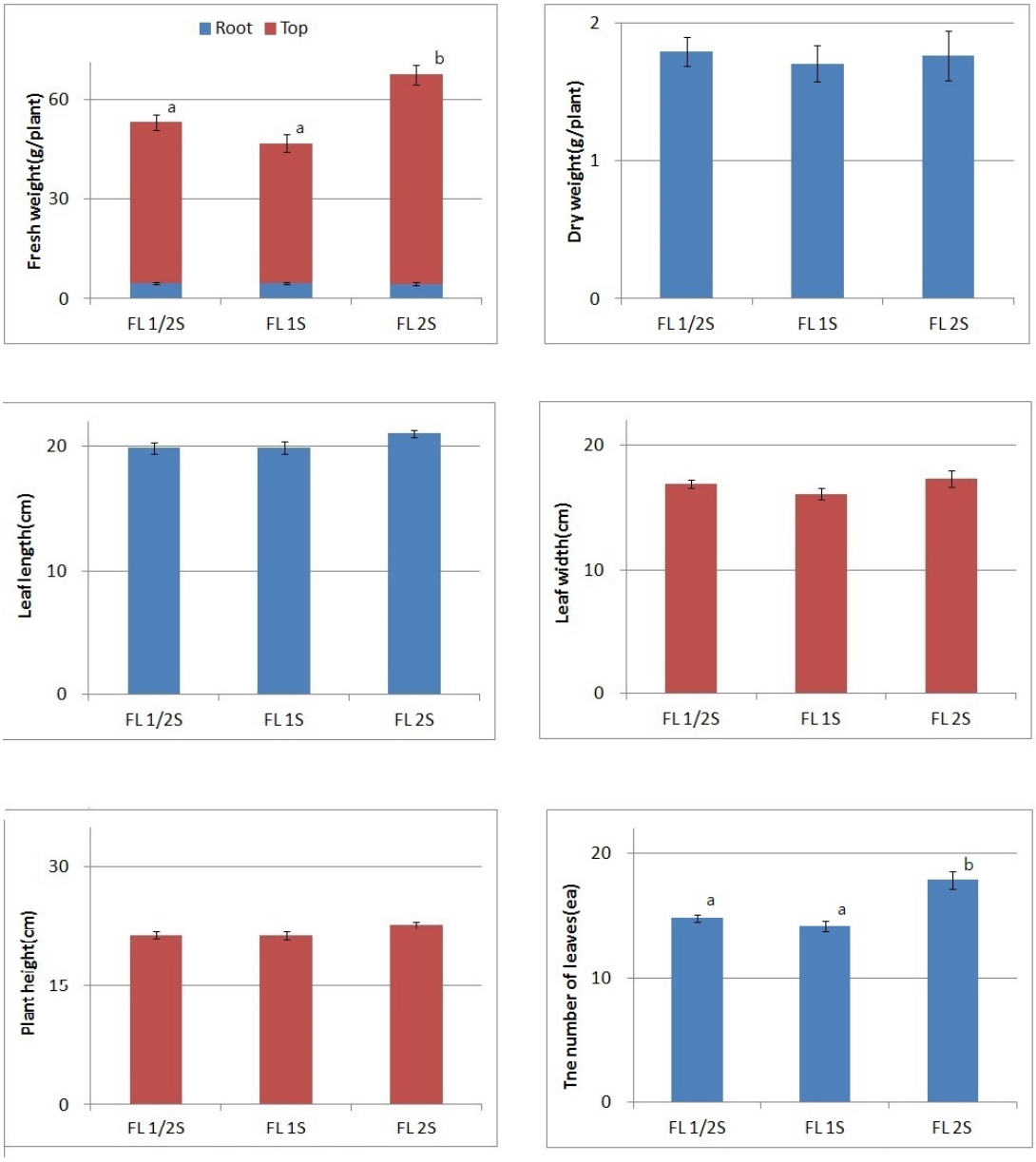


Fig. 1. Growth responses of leaf lettuce grown at different nutrient element concentrations under fluorescent lamp in a closed hydroponic culture system for 28days after transplanting

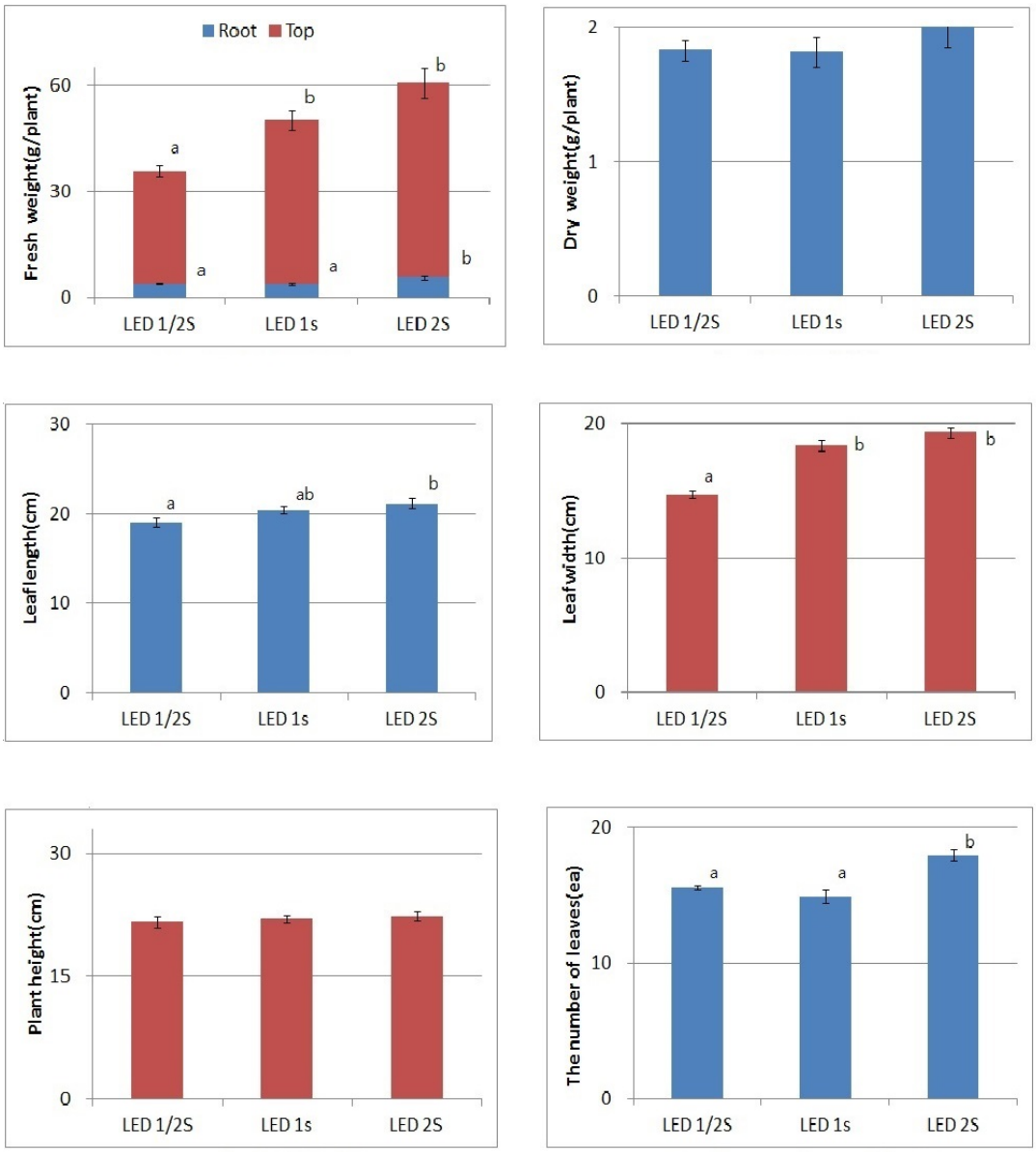
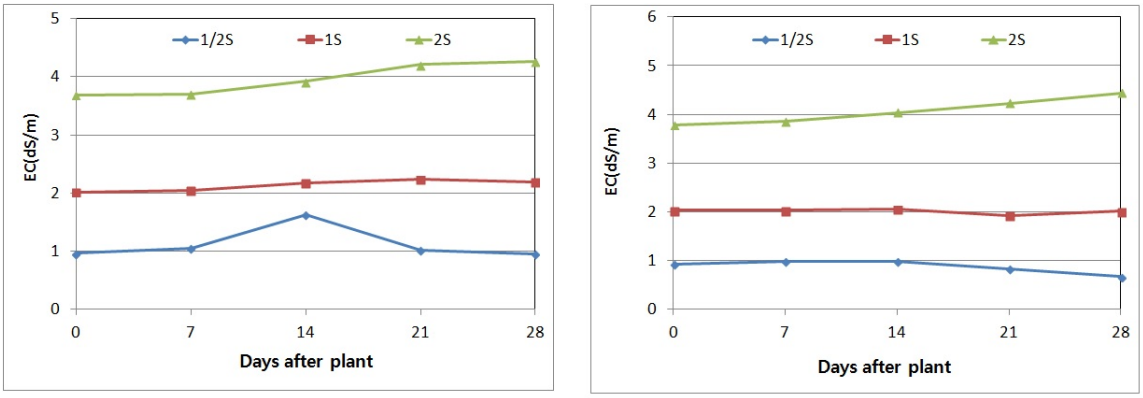


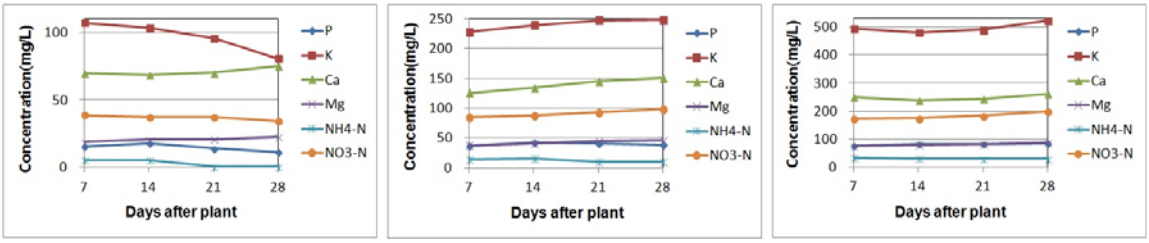
Fig. 2. Growth responses of leaf lettuce grown at different nutrient element concentrations under LED in a closed hydroponic culture system for 28days after transplanting

인공광 식물공장 내에서 일본 야채다업시험장 표준배양액의 1/2배액, 1배액, 2배액에서 적축면 상추를 수경재배 하였을 때, 형광등 조건에서 배양액 농도에 따른 배양액내 무기성분 함량은 2배액, 1배액, 1/2배액 처리구 순으로 높은 값을 나타내었다(Fig. 4). 1/2배액 처리구에서는 재배기간이 경과함에 따라 칼슘과 마그네슘 함량은 증가하고 칼륨, 인산, 암모니아태질소 함량은 감소하는 경향을 보였다. 1배액 처리구에서는 칼륨, 칼슘과 질산태질소, 마그네슘 함량은 모두 증가하



a. fluorescent lamp b. LED

Fig. 3. Changes in the EC of the recycled nutrient solution at different nutrient element concentrations in a closed hydroponic leaf lettuce culture system affected by different light sources

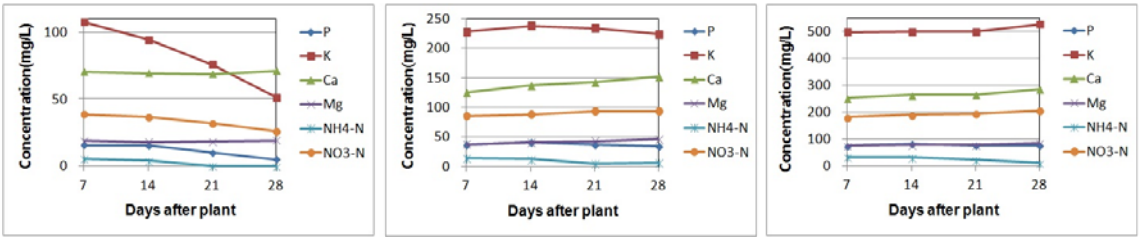


a. 1/2S b. 1S c. 2S

Fig. 4. Changes in the concentrations of NO_3-N, NH_4-N, PO_4-P, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} in the recycled nutrient solution at different nutrient element concentrations under fluorescent lamp in a closed hydroponic leaf lettuce culture system

고 암모니아태질소 함량은 감소하는 경향을 보였다. 2배액 처리구에서는 칼륨, 칼슘과 질산태질소 함량은 다소 증가하나 인산, 암모니아태질소, 마그네슘 함량이 처음과 비슷한 수준을 유지하는 것으로 나타났다. Roh et al.(2009)은 오이를 순환식 수경재배 하였을 때 순환배양액내 다량원소의 농도 변화 양상은 배양액조성에 관계없이 NO_3-N, Ca^{2+}, Mg^{2+} 및 SO_4-S는 지속적 증가형, NH_4-N는 지속적 감소형, PO_4-P와 K^+는 생식생장기 감소형으로 분류할 수 있다고 하였다. 본 실험에서는 NO_3-N, Ca^{2+}, Mg^{2+}는 1배액과 2배액 처리구에서 지속적으로 증가하였으며, NH_4-N는 1배액과 1/2배액 처리구에서 지속적으로 감소한 것으로 나타났다. 2배액 처리구에서 칼륨, 칼슘과 질산태질소 함량은 다소 증가하였으나 전체적으로 다량원소의 농도가 안정적인 경향을 보이는 것으로 나타났다.

LED 조건에서 배양액 농도에 따른 배양액내 무기성분 함량은 2배액, 1배액, 1/2배액 처리구 순으로 높은 값을 나타내었다(Fig. 5). 1/2배액 처리구에서 재배기간이 경과함에 따라 칼륨 함량은 감소 폭이 컸으며, 인산, 암모니아태질소, 질산태질소 함량은 감소하는 경향을 보였다. 1배액 처리구에서는 칼슘, 마그네슘, 질산태 질소 함량은 증가하고 암모니아태질소 함량은 감소하는 경향을 보였다. 2배액 처리구에서는 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 질산태 질소 함량은 다소 증가하고 암모니아태질소 함량은 감소하는 경향을 보였다. 정식 3주 경과 후에 암모니아태질소 함량이 감소하는 것으로 보아 암모니아태 질소 흡수가 많이 일어나는 것으로 판단되었다.



a. 1/2S b. 1S c. 2S

Fig. 5. Changes in the concentrations of NO_3-N, NH_4-N, PO_4-P, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} in the recycled nutrient solution at different nutrient element concentrations under LED in a closed hydroponic leaf lettuce culture system

야채다업시험장 배양액 농도처리(1/2배액, 1배액, 2배액)에 따른 양수분 흡수율을 야마자키가 제시한 n/w방법에 의하여 산출한 결과 1/2배액, 2배액 처리구에서 양수분 흡수율이 높은 것으로 나타났다(Table 1). 배양액 농도에 따른 배양액 흡수양상은 두 광원 모두에서 배양액 농도에 관계없이 칼륨 흡수가 잘 이루어지는 것으로 나타났다. 저농도인 1/2배액 처리구에서는 배양액 농도에 따른 배양액 흡수양상은 두 광원 모두에서 배양액 농도에 관계없이 칼륨 흡수가 잘 이루어진 것으로 나타났다.

적축면 상추 엽내 무기성분 분석결과 형광등에서 P 1.3~1.6, K 7.5~8.6, Ca 1~1.5, Mg 0.3~0.4, LED에서 P 1.2~1.6, K 6.4~7.8, Ca 1.3~1.7, Mg 0.3~0.4%로 P를 제외한 성분에서 Lee(2000)이 제시한 상추의 적정 무기 성분함량 범위 내에 분포하였으며, P의 경우에 있어서는 적정 범위인 0.5~0.8보다 높게 나타나 적정 농도를 적정범위 수준으로 유지할 수 있도록 무기양분의 공급량을 증가시켜야 할 것으로 판단되었다(Table 2).

Ⅳ. 적요

본 연구는 인공광을 이용한 순환식 수경재배시 배양액농도가 적축면 상추 생육과 배양액내 다량원소 농도의 변화에 미치는 영향을 구명하고자 수행되었다. 형광등과 LED의 광도는 100μmol $m^{-2}\cdot s^{-1}$±20 수준이었으며, 배양액 농도는 일본

Table 1. Calculated n/w[z] value of leaf lettuce based on the Yamasaki's formula

Nutrient Conc.	Items Measured[y]	Water (L)	Items Measured	NO_3-N	NH_4-N	PO_4-P	K	Ca	Mg
				me/L					
LED 1/2 S	a	20	y	2.76	0.40	1.52	2.76	3.52	1.58
	w	4.06	y^1	1.85	0.00	0.50	1.31	3.54	1.61
	a/w	4.93	n/w[y]	6.31	1.95	5.53	8.44	3.42	1.46
LED 1 S	a	20	y	6.06	1.04	3.56	5.86	6.27	3.11
	w	5.09	y^1	6.67	0.43	3.31	5.75	7.62	3.83
	a/w	3.93	n/w	4.30	2.84	4.28	6.16	2.34	1.02
LED 2 S	a	20	y	12.98	1.59	7.45	12.80	12.69	6.42
	w	3.62	y^1	14.75	0.98	7.58	13.55	14.32	7.21
	a/w	10.67	n/w	4.93	4.34	6.86	9.40	5.30	2.84
FL 1/2 S	a	20	y	2.76	0.40	1.51	2.75	3.49	1.57
	w	4.78	y^1	2.45	0.04	1.11	2.07	3.75	1.87
	a/w	4.18	n/w	3.72	1.51	2.80	4.91	2.67	0.60
FL 1 S	a	20	y	6.09	1.00	3.57	5.86	6.30	3.12
	w	4.81	y^1	7.03	0.70	3.68	6.37	7.52	3.86
	a/w	4.16	n/w	3.11	1.94	3.22	4.25	2.44	0.79
FL 2 S	a	20	y	12.38	2.43	7.43	12.67	12.52	6.32
	w	6.6	y^1	14.17	2.18	8.26	13.38	13.01	7.41
	a/w	3.03	n/w	8.77	2.95	5.76	11.25	11.53	4.11

[z]n/w indicates the formula devised by Yamasaki to determine the amount of macro nutrients and water uptake at regular intervals during substrate culture.
if $y>y_1$, $n/w=a/w(y-y_1)+y_1$: $y<y_1$, $n/w=-a/w(y_1-y)+y_1$
[a indicates initial volume of culture solution in each tray(liter).
w indicates the amount of water absorbed by plants(liter).
y and y_1 indicates the initial and final concentration of macronutrients in the culture solution(me · L_{-1})]
[y]S indicates standard nutrient solution of Horticultural Experiment Station in Japan.

Table 2. Changes in the mineral contents of leaf lettuce at different nutrient element concentrations in a closed hydroponic culture system harvested from 28 days after transplanting

Artificial light	Nutrient solution concentration	Nutrient content(%)			
		P	K	Ca	Mg
fluorescent lamp	1/2S	1.19	7.68	1.68	0.33
	1S	1.5	7.8	1.44	0.37
	2S	1.59	6.36	1.3	0.39
LED	1/2S	1.34	8.53	1.49	0.32
	1S	1.59	8.56	1.34	0.35
	2S	1.48	7.52	0.96	0.35

야채다업시험장 표준배양액의 1/2배액, 1배액 및 2배액 수준이었다. 일주일마다 줄어든 배양액 양만큼 보충하면서 재배되는 수경재배시스템에서 적축면 상추('뚝섬' 동부하이텍, 품종)를 재배하였다. 적축면 상추의 생육은 농도가 진한 2배액에서 가장 좋은 것으로 나타났다. 재배기간 중 배양액의 EC는 1배액에서는 2dS.m^{-1} 내외에서 비교적 안정적으로 유지된 반면 2배액에서는 상승하는 경향을 보였다. 배양액의 무기성분 함량은 2배액, 1배액, 1/2배액 순으로 높았다. 재배기간 중 배양액 내 NO_3-N, Ca^{2+}, Mg^{2+} 농도는 1배액, 2배액에서 지속적으로 증가한 반면, NH_4-N 농도는 1배액, 1/2배액에서 지속적으로 감소하는 결과를 나타내었다. 적축면 상추 엽내 K, Ca, Mg 함량은 정상 범위를 유지한 반면, P 함량은 1.3~1.6%로 적정 성분함량 범위 보다 높게 나타났다. 적축면 상추재배 시 재배기간이 경과함에 따라 NH_4-N 함량이 감소하는 경향을 보여 NH_4-N 비율을 높이거나 더 첨가해 줄 필요가 있는 것으로 나타났다.

V. 참고문헌

1. 박미희, 심미영, 이용범. (1998). 잎상추 수경재배에서 근권 EC가 무기이온흡수, 광합성 및 생육에 미치는 영향, 한국생물환경조절학회 논문집, 21(4), 158-161.
2. 이상규. (2012). 식물공장 내 EC 농도가 쌈채소의 생육과 품질에 미치는 영향, 원예과학기술지, 30(S2), 1226-8763.
3. 조우재, 김학진, 정대현, 김동욱, 안태인. (2016). 정밀 양액 영양분 관리를 위한 이온현장 모니터링 시스템 개발, 한국농업기계학회 학술발표논문집, 21(2), 198-198.
4. 조자용, 이정필, 서범석, 정순주. (1994). 배양액종류가 분무경 방울토마토의 생장과 발육에 미치는 영향, 한국생물생산시설환경학회 심포지움 및 학술논문 발표요지, 3(2), 74-75.
5. 차미경, 김주성, 조영열. (2012). 배양액 농도와 광도가 식물공장에서 재배되는 적축면 상추의 생장에 미치는 영향, 한국생물환경조절학회 논문집, 21(4), 305-311.
6. Kang, H. M., and Kim, I. S. (2007). Effect of nutrient solution composition modification on the internal quality of some leaf vegetables in hydroponics, J. Bio-Environ. Con., 16(4), 348-351.
7. Cha, M. K., Kim, J. S., and Cho, Y. Y. (2012). Growth Response of Lettuce to Various Levels of EC and Light Intensity in Plant Factory, J. Bio-Env. Con., 21(4), 305-311.
8. Lee, Y. B. et al. (2000). Development of optimum nutrient management system in a plant factory, The last report of Agricultural R&D promotion center, Korea.
9. Lee, S. G., Choi, C. S., Lee, J. G., Jang, Y. A., and Nam, C. W. (2012). Effects of different EC in nutrient solution on growth and quality of red mustard and pak-choi in plant factory, J. Bio-Environ. Cont., 21, 322-326.
10. Park, M. H., and Lee, Y. B. (1996). Effect of light intensity and nutrient level on the growth and quality of leaf lettuce in a plant factory, J. Bio-Env. Con., 8, 108-114.
11. Park, M. H., Shim, M. Y., and Lee, Y. B. (1999). Effects of pH Level and Electrical Conductivity on Growth, Nutrient Absorption, Transpiration and CO2 assimilation of Leaf Lettuce in

Hydroponics. J. Bio-Environ. Cont., 8(2), 115-124.

12. Roh, M. Y., Choi, G. L., Rhee, H. C., Seo, T. C., Kim, W. S., and Lee, Y. B. (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.
13. Yamasaki, K. (1981). The problem and present state of hydroponic culture (1), Nutrient solution management of hydroponic culture-nutritive characteristic of each crop by nutrient/water, Agr. and Hort., 56, 563-568.
14. Yamasaki, K. (1982). A review on solution culture, Hakuyusha, Toyko, 34-49.