생물환경조절학회지 (J. Bio-Env. Con.) 8(2) : 115~124, 1999

잎상추 수경재배에서 근권 pH와 EC가 무기이온흡수, 광합성, 증산량 및 생육에 미치는 영향[1)]

박미희 · 심미영 · 이용범*
서울시립대학교 환경원예학과

Effects of pH Level and Electrical Conductivity on Growth, Nutrient Absorption, Transpiration and CO_2 assimilation of Leaf Lettuce in Hydroponics

Park, Mi-Hee · Shim, Mi-Young · Lee, Yong-Beom*
Dept. of Environmental Horticulture, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

Abstract

This study was conducted to determine the optimum root zone environment condition and proper nutrient management system for lettuce in hydroponics. For the root zone environment condition, several level of pH and electrical conductivity (EC) were treated respectively. Though all the level of pH 4 to pH 8, except pH 3, performed better growth without any visible physiological disorder, the optimum pH of the nutrient solution for lettuce production was pH 5.5 to 6.0. The optimum ionic strength of the solution was EC 1.2 to 1.6 mS cm^{-1} because higher nutrient level caused tip burn symptom by calcium deficiency. Considering the above results, it is concluded that lettuce can be efficiently mass-produced through the optimum root zone environment.

주제어 : *Lactuca sativa* L., 잎끝마름증, 근권환경
Key words : *Lactuca sativa* L., tip burn, root zone environment
* corresponding author
1) This research was funded in part by the R&D Promotion Center for Agriculture and Forestry in Korea.

서 론

수경재배는 배양액의 농도, 용존산소, 온도 등을 조절하여 뿌리의 흡수기능을 최적으로 유지할 수 있도록 작물의 생장제어가 가능한 재배시스템이다(Ho, 1995). 최근에는 수경재배 방식을 근간으로한 자동화 시설과 복합 환경제어 시스템이 구비되어 신선채소의 규격생산, 주년 대량생산이 가능한 식물공장이 21세기의 새로운 원예작물 생산시스템으로 대두되고 있다. 식물공장에서는 최소의 경비를 투입하여 최대 수량을 얻거나 재배기간을 단축하기 위해 고도로 기능화된 작물생산 시설에서 광, 온도, 습도, CO_2 농도 등의 지상부 환경조절과 배양액의 pH, 배양액농도, 용존산소량, 배양액온도 등의 지하부 환경제어가 필수적이다. 일반적으로 배양액의 pH는 무기성분의 흡수에 있어 주요한 요인으로, 5.5~6.5가 적당하고(Adams 등, 1992; 山崎, 1981), EC는 1.0~1.5 mS cm^{-1}(Abou-Hadid 등, 1996; Holder와 Christensen,1988) 또는 2.0 mS cm^{-1} (Cresswell, 1991)라는 보고가 있으나 이들은 그 대상범위가 좁고 생산적인 측면만 고려된 결과들이어서, 상추의 전체적인 생육반응을 알기에 부족하다. 따라서 폭넓은 범위의 pH, EC에 대한 상추의 무기성분 흡수반응과 함께 생리적·생산적 측면에 관한 연구가 필요하다. 따라서, 본 실험은 상추 수경재배시 배양액의 pH와 EC 상추의 생육에 미치는 영향을 밝혀 식물공장에서 활용가능성이 큰 상추의 최적 배양액 조건을 구명하고자 수행하였다.

재료 및 방법

1. 배양액의 pH가 상추생육에 미치는 영향

잎상추를(*Lactuca sativa* L. 'Brigida') 1997년 3월 29일에 폴리우레탄 스폰지에 파종하여 5월 10일에 벤로온실에 정식하였다. 재배 시스템은 박막수경법(NFT)으로 스티로폼 성형 제품[40(W)×120(L)×15(H)cm] 베드에서 수행하였다. 베드는 배액구쪽에 20 ℓ 급배액용기를 설치한 후 15W용량의 수중전기펌프를 사용하여 배양액을 순환시켰다. 배양액은 서울시립대학교 잎상추 배양액(N 11.7, P 2.0, K 6.7, Ca 3.5, Mg 2.0 meL^{-1})을 사용하였다(남, 1998). 배양액내 염류농도는 EC자동조절기(CETW-300T, Kawamoto)로 1.5±0.2 mS · cm^{-1}를 유지하였고, 배양액의 산도는 pH자동조절기(PET-300A, Kawamoto)를 사용하여 pH 3.0, 4.0, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 8.0으로 각각 조절하였다. pH조절은 KOH와 H_2SO_4로 하였다. 생육조사와 광합성(Li-6200, Li-COR), 증산량(Li-1600, Li-COR) 측정은 정식 26일 후에 하였다. 생육조사는 엽수, 최대엽장, 최대엽폭, 지상부와 지하부 생체중, 건물중 등을 조사하였다. 식물체는 생육조사 후 지상부와 지하부를 각각 건조기에 넣어 65℃에서 건조시킨 다음, 건물중 변화가 없을때 측정하였고 지상부는 마쇄하여 분석시료로 사용하였다. 식물체내 질소함량을 측정하기 위하여 분쇄된 시료를 0.5 g씩 칭량하여 kjeldahl flask에 넣고 분해촉진제($CuSO_4$:K_2SO_4=1:9) 5 g과 진한 황산 10 ㎖를 가하여 분해조에서 360℃로 2시간 동안 분해하였다. 분해액은 질소자동증류기(Büchi 323, Büchi, Switzerland)로 증류하여 0.005 N-H_2SO_4로 적정하여 전질소함량을 측정하였다. 질소이외의 무기이온 함량을 측정하기 위하여 시료 0.5 g을 칭량하여 100 ㎖ 삼각플라스크에 넣고 ternary solution (HNO_3 : H_2SO_4 : $HClO_4$ =10 : 1 : 4)을 10 ㎖ 넣고 360℃ 전열판에서 6-7시간 분해한 후, 인산은 vanadate법으로 470 nm에서 비색계(UV 2100, Shimadzu)를 사용하여 분석하였고,

칼륨, 칼슘과 마그네슘은 원자흡광광도계(Perkin Elmer 3100, Perkin Elmer, U.S.A.)를 사용하여 정량한 후 건물중에 대한 백분율(%)로 환산하였다.

2. 배양액의 농도(EC)가 상추생육에 미치는 영향

잎상추를 (*Latuca sativa* L. 'Brigida') 1997년 3월 29일에 폴리우레탄 스폰지에 파종하여 5월 10일에 벤로온실에 정식하였다. 재배 시스템은 박막수경(NFT)방식이었고 배양액은 서울시립대학교 잎상추 배양액을 사용하였다(남, 1998). 배양액의 pH는 pH자동조절기를 사용하여 pH 5.8±0.2로 조절하였고 EC는 EC자동조절기를 사용하여 0.8, 1.2, 1.8, 2.4, 3.6 $mScm^{-1}$로 조절하였다. 배양액의 pH는 KOH와 H_2SO_4를 이용하여 조절하였다. 생육조사와 광합성, 증산량을 측정하였고 식물체분석과 배양액분석은 앞의 pH실험과 동일하였다.

결과 및 고찰

1. 배양액의 pH가 상추생육에 미치는 영향

배양액의 pH가 3.0에서 6.5로 증가함에 따라 광합성은 증가하고 기공저항은 감소했다. 그러나 증산량은 pH 3.0에서 pH 5.0까지는 증가하였으나 pH 5.0부터 pH 7.0까지는 통계적인 유의성이 없었다. 광합성 속도와 증산량은 pH 5.0이상의 처리구에서 거의 차이가 없었으며 기공저항은 pH 5.5 이상에서 낮게 나타나 山崎(1981)가 보고한 pH 5.5~6.5 범위보다는 조금 넓은 pH 5.0~7.0정도의 범위에서도 생리적인 활성이 원만하게 유지되는 것으로 보였다(Table 1).

엽내 무기성분함량은 N와 K의 경우 pH 5.0 이상에서는 함량의 차이가 없었으나 pH 5.0 이하에서는 급속히 감소하였다. 엽내 Ca과 P함량은 pH 6.0 이상에서 낮아지는 경향을 보였고 Mg은 pH 3.0을 제외하고는 함량차이가 별로 없었다(Fig. 1). 이는 pH가 6.0 이상이 되면 배양액내의 Ca와 P가 침전되어 그 유효도가 급격히 떨어지기 때문이다(Diatloff, 1994). pH 3.0에서는 모든 다량원소의 엽내 함량이 가장 낮게 나타났으며 뿌리에 심한 손상과 갈변이 관찰되었는데, 이것은 뿌리의 세포막 붕괴로 인해 이온흡수가 안 되었기 때문으로 보인다. Bres 등(1992)은 배양액 pH를 5.0, 5.5, 6.0, 6.5로 처리했을 때 pH가 상추엽내 질소함량에 영향을 주지 않았지만 K함량은 pH가 높아짐에 따라 증가했고 결과적으로 Ca나 Mg에 대한 K비율이 증가했다고 했다. 비록 배양액 pH가 P, Ca, Mg 함량에 영향을 주지만, 무기성분함량 차이는 크지 않았고 그 차이가 상추의 생체중 차이와 관련이 있는 것은 아니라고 해 본 실험과 유사한 경향을 보였다.

근권 pH별 배양액내 N, K의 농도는 정식 2주 후에 낮게 나타났으며 3주 후부터 다시 높아졌다(Fig. 2). 이러한 수치의 변화는 아직 명확하게 설명되지는 않는다. 반면 P농도는 정식 2주 후부터 계속 낮아졌다. 특히 pH 8.0은 초기부터 P의 농도가 매우 낮게 유지되었는데 이는 알칼리 조건에서 $Ca_3(PO_4)_2$형성으로 인해 그 함량이 낮게 나타난 것으로 생각된다. Ca, Mg의 함량은 pH처리구별 생육기간내 변화의 폭이 적었으나 점차 증가하는 경향을 보였다. 근권 K, Ca, Mg농도는 pH 3.0에서 가장 낮게 나타났으나 N, P는 가장 높게 유지되었다. 이는 낮은 pH에서 이들 이온의 유효도가 낮아지기 때문인 것으로 보인다.

Table 1. Effect of pH levels on CO_2 assimilation rate, transpiration rate and stomatal resistance of leaf lettuce grown in nutrient film technique.

pH	CO_2 assimilation (μmol m^{-2} s^{-1})	Transpiration rate (μg cm^{-2} s^{-1})	Stomatal resistance (s cm^{-1})
3.0	4.07 c^z	11.83 c	1.088 a
4.0	5.65 b	38.15 b	0.628 b
5.0	6.25 ab	46.13 a	0.480 c
5.5	6.30 ab	44.86 a	0.289 d
6.0	6.43 ab	45.15 a	0.363 cd
6.5	7.05 a	43.51 a	0.278 d
7.0	6.36 ab	43.06 a	0.270 d
8.0	5.18 b	43.46 a	0.285 d

^{z}Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, significant at 5% level.

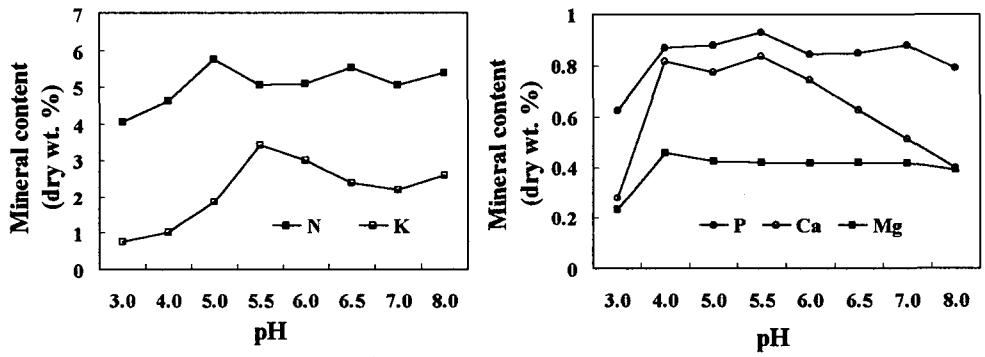

Fig. 1. Mineral contents in leaf lettuce as influenced by pH control of nutrient solutions.

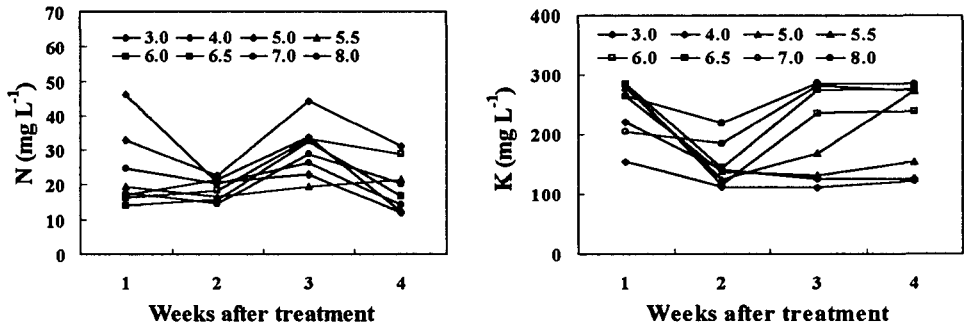

Fig. 2. Changes in NO_3-N and K concentration in the nutrient solution during 4weeks after pH control of nutrient solutions.

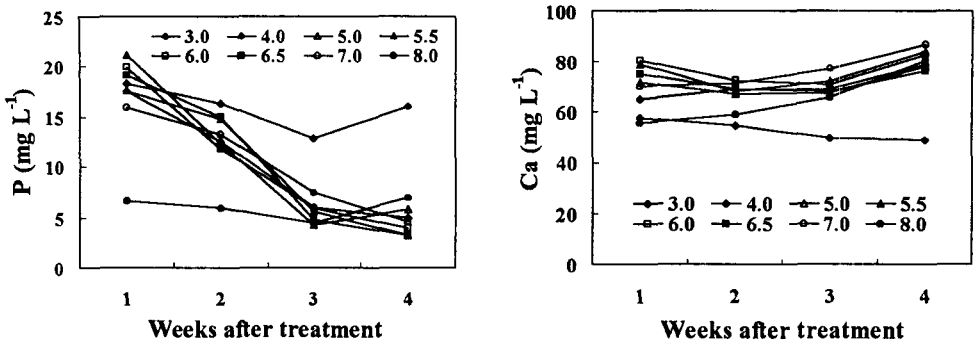

Fig. 3. Changes in P and Ca concentrations in the nutrient solution during 4weeks after pH control of nutrient solutions.

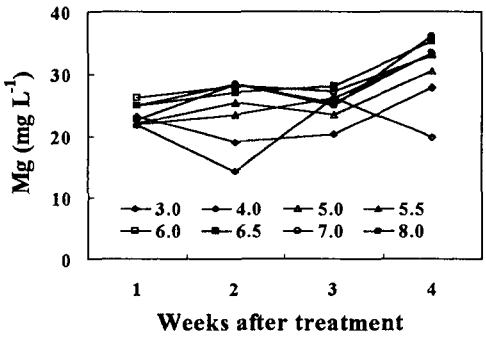

Fig. 4. Change in Mg concentration in the nutrient solution during 4weeks after pH control of nutrient solutions.

근권 pH가 3.0에서 6.5로 증가함에 따라 엽수, 엽장, 엽폭을 비롯한 생체중, 건물중이 증가하였으나 pH 7.0과 pH 8.0에서는 감소하였다(Table 2). 근권 배양액의 pH 7.0과 pH 5.5 처리구를 비교하면 엽장, 엽폭은 같으나 엽수는 pH 7.0이 많음에도 불구하고 생체중과 건물중은 pH 5.5가 크게 나타나 잎의 두께생장에 차이가 있는 것으로 예상되고이것에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 잎상추의 생체중과 건물중 모두 pH 5.5~6.5에서 가장 높게 나타나 수경재배의 최적 pH 범위임을 알 수 있었다. pH 3.0에서는 생육이 현저하게 감소했다. 이는 뿌리의 심한 손상으로 인해 수분과 이온흡수가 원활히 이루어지지 않았기 때문이다. pH 4.0, 7.0 및 8.0도 생체중이 감소하여 적정 pH범위로 볼 수 없으나 가시적인 생리장해를 나타내지 않는 것으로 보아 상추가 넓은 pH범위에 적응할 수 있는 것으로 생각되었다. 位田(1982)는 뿌리 세포의 효소활성이 H^+농도에 영향을 받는데, pH가 높고 낮음에 따라 가시적인 장해를 나타내지는 않아도 생육에 영향을 받으며, pH가 낮아지면 옥신이나 사이토키닌의 활성이 낮아져 발근이나 뿌리신장이 나빠진다하여 이를 입증하고 있다. 位田(1982)는 파종 후 2~3주된 상추 유묘에서 pH 7.0에서 생체중이 높았고 산성부근(pH3.0~4.0)에서도 생육 불량이 없었으며 pH 5.0~8.0 사이에 생육 차이가 작았다고 보고했는데, 본 실험결과와는 약간 차이를 보여주고 있다. Arnon 등(1942)은 토마토에서 pH 5~7범위에서는 생육이크게 영향을 받지 않았고 이 범위를 벗어났을 때는 생육이 급격하게 감소했다고 하여

pH 5.0부터 7.0까지는 채소작물생육에 큰 장해가 없음을 알 수 있다. 이상에서 볼 수 있듯이 상추 수경재배에서 근권내 적정 pH는 광합성, 증산량 및 생육량의 결과를 미루어 봤을 때 pH 5.5~6.5로 보였다. 그러나, 엽내 무기성분 함량면에서, pH 6.5에서 Ca함량이 낮아지는 것으로 나타났다. 따라서 pH 6.5 이상에서 생육하면 잎끝마름증(tipburn)이 나타나 상추품질을 저하시킬 것으로 예상되므로, 최적 근권 pH는 5.5~6.0범위인 것으로 판단된다. 또한, pH 3.0을 제외한 pH 4.0, 7.0, 8.0 에서는 가시적인 장해를 나타내지 않고 약간의 생육감소만 보이므로 상추가 넓은 범위의 pH에 적응할 수 있는 것으로 생각된다.

Table 2. Effect of pH levels on growth of leaf lettuce grown in nutrient film technique.

pH	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g plant^{-1})	
				Top	Root
3.0	11.5 b[z]	8.25 c	8.35 d	6.56 c	6.84 c
4.0	20.5 ab	15.2 b	14.9 c	79.6 bc	24.25 b
5.0	21.0 ab	15.5 b	15.8 ab	90.0 ab	23.6 b
5.5	22.0 ab	16.0 ab	17.3 a	104.9 a	29.0 ab
6.0	23.5 a	16.8 a	16.3 ab	104.2 a	36.9 a
6.5	24.0 a	17.3 a	17.5 a	112.8 a	33.3 a
7.0	23.5 a	16.0 ab	17.3 a	94.1 ab	30.3 ab
8.0	21.5 ab	16.3 ab	16.7 a	94.3 ab	27.4 ab

[z]Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, significant at 5% level.

2. 배양액의 농도(EC)가 상추생육에 미치는 영향

배양액 농도는 1.2 mS · cm^{-1}와 1.6 mS · cm^{-1} 에서 자란 상추의 CO_2동화율이 다른 EC범위의 것보다 높았다. 증산량과 기공저항은 전처리구간 차이가 없었으나 농도가 높아질 수록 증산량이 점차 낮아지는 것을 보였다(Table 3). 이것은 배양액 농도가 높아질 수록 수분흡수가 어려워 증산작용이 낮아지기 때문인 것으로 보이며 EC 1.2~1.6mS · cm^{-1}에서 뿌리의 양수분 흡수가 원활히 이루어져서 생육이 왕성히 이루어 진 것으로 생각된다.

일반적으로 무기성분의 흡수는 배양액내 무기성분 농도에 비례한다(Adams, 1992). 식물체내 무기이온 함량에서 N, K는 전기전도도가 높아질수록 엽내 함량이 증가하는 경향을 보였으나 1.6 mS · cm^{-1} 부터 3.6 mS · cm^{-1} 까지 거의 비슷한 함량을 나타냈다. P는 EC가 0.8~2.4 mS · cm^{-1}로 증가함에 따라 엽내 함량이 높았으나 3.6 mS · cm^{-1}에서는 감소경향을 보였다. Ca, Mg 함량은 EC 2.4 mS · cm^{-1}까지 거의 비슷한 함량을 나타냈으나, Ca은 3.6 mS · cm^{-1} 에서 현저히 그 함량이 낮아졌다(Fig 5). 이는 전기전도도(EC)가 증가되면 뿌리의 상대수분함량과 근활력이 감소를 보이고 뿌리의 삼투압저하로 인한 수분흡수가 억제되어 Ca이동의 저하로 인한 Ca결핍이 일어날 수 있다는 보고(Ehret 등, 1986)와 합치되는 결과로서 상추재배시 근권 EC수준이 상추 품질에 큰 영향을 미칠 수 있는 증거라고 생각된다.

배양액내 무기이온 농도는 전기전도도(EC)가 높은 처리구일수록 높게 나타났으며 같은 처리구내 생육기간에 따른 무기이온 함량의 변화폭은 적었다. N, K 농도

는 고농도를 제외하고 식물생육이 왕성한 정식 2주 후부터 저하되었다. P함량은 저농도(0.8, 1.2 mS · cm^{-1})에서 2주 후부터 감소되어 저농도로 유지될 때 시간이 지남에 따라 P의 결핍가능성이 예상되었다. 배양액내 Ca함량은 생육이 지속될수록 증가되고 있다. 특히 고농도인 3.6 mS · cm^{-1}에서는 근권내 Ca함량은 높아지고 식물체의 Ca흡수는 낮아져 생육 후기에 Ca 결핍을 유도하는 것으로 보인다(Cramer 등 1985). 배양액내 Mg함량은 생육이 지속될수록 약간 높아지는 경향을 보였으나 변화폭은 크지 않았다(Fig. 6, 7, 8).

Table 3. Effect of EC levels on CO_2 assimilation rate, transpiration rate and stomatal resistance of leaf lettuce grown in nutrient film technique.

EC (mS cm^{-1})	CO_2 assimilation (μmol m^{-2} s^{-1})	Transpiration rate (μg cm^{-2} s^{-1})	Stomatal resistance (s cm^{-1})
0.8	8.62 b[z]	37.1	0.31
1.2	9.30 ab	38.5	0.33
1.6	10.02 a	37.8	0.24
2.0	9.02 b	38.2	0.22
2.4	9.07 b	36.8	0.28
3.6	9.04 b	36.6	0.29

[z]Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, significant at 5% level.

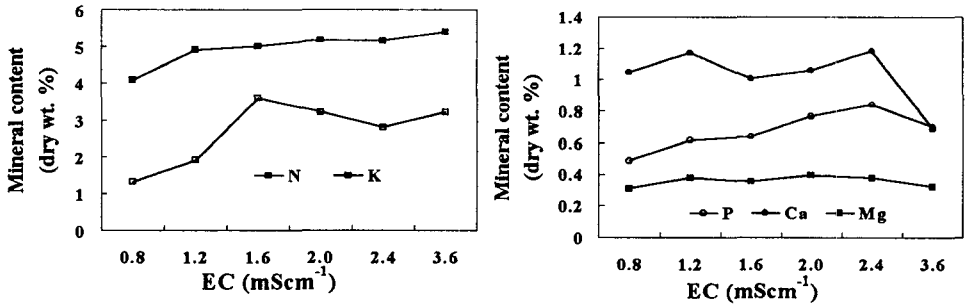

Fig. 5. Mineral contents in leaf lettuce as influenced by EC control of nutrient solutions.

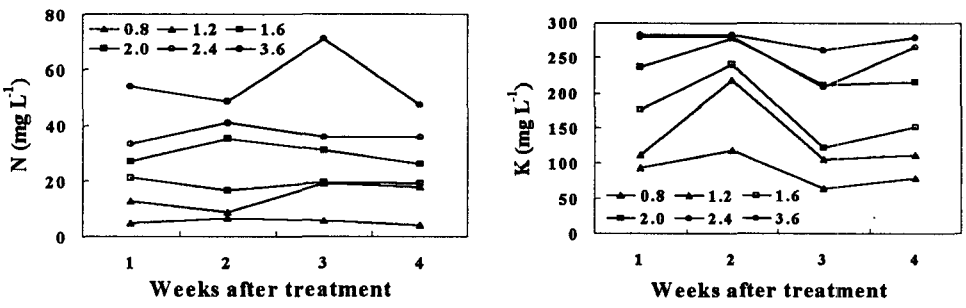

Fig. 6. Changes in NO_3-N and K concentrations in the nutrient solution during 4weeks after EC control of nutrient solutions.

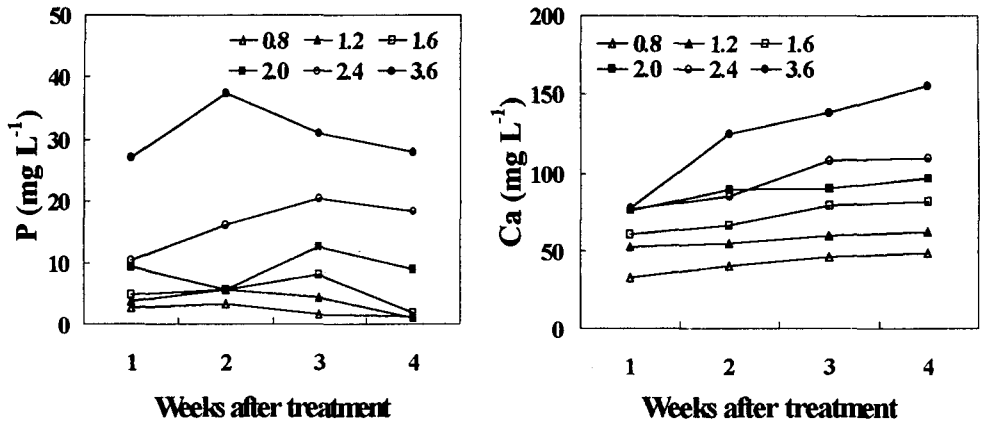

Fig. 7. Changes in P and Ca concentrations in the nutrient solution during 4 weeks after EC control of nutrient solutions.

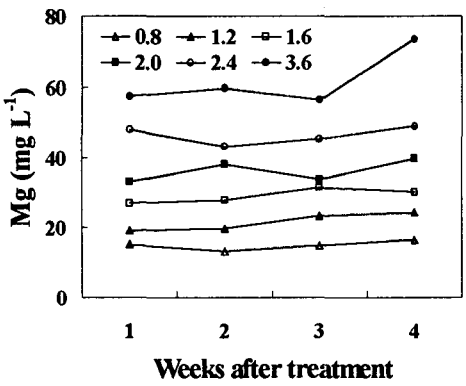

Fig. 8. Change in Mg concentration in the nutrient solution during 4 weeks after EC control of nutrient solutions.

상추 생육은 전기전도도 1.2 mS·cm^{-1} 부터 2.4 mS·cm^{-1}까지 거의 비슷한 생육량을 나타냈다. 특히 1.2와 1.6 mS·cm^{-1} 에서 가장 높은 건물중과 생체중을 나타냈고 0.8과 3.6 mS·cm^{-1}에서 가장 낮은 생육량을 보였다(Table 4). EC 2.0 mS·cm^{-1} 처리구가 다른 처리구보다 생육이 낮게 나타난 것은 생육 초기에 양액 공급펌프의 정지로 인해 일시적인 수분스트레스를 받은 영향때문으로 생각된다. 또, 3.6 mS·cm^{-1} 에서는 엽내 Ca의 함량이 낮아(Fig. 5.) 생육이 낮아졌으며 특히 생육후기는 잎끝마름증(tipburn)현상도 나타나기 시작하였다. 일반적으로 고농도에서는 생장이 억제되는 것을 볼 수 있는데 이것은 고농도에 의한 배지의 삼투포텐샬의 저하로 흡수가 낮아지고, 특정이온의 과잉흡수나 흡수장해가 생기는 데에 기인하는 것으로 보인다. Sonneveld(1993)에 따르면 토마토에서 Ca와 Mg의 흡수는 고농도 EC에서 가장 낮았다고 한다. 이것은 양이온의 전체흡수량은 배양액의 농도와 상관없이 일정하나, 고농도일수록 Ca이나 Mg 같은 2가 양이온보다 K같은 1가 양이온의 이동성이 빨라 상대적으로 Ca, Mg 흡수가 낮아지게 되기 때문으로 보여진다.

Table 4. Effect of EC levels on growth of leaf lettuce in nutrient film technique.

EC (mS cm^{-1})	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Fresh weight (g plant^{-1})		Dry weight (g plant^{-1})	
				Top	Root	Top	Root
0.8	20.5 a[z]	16.3 a	16.5 ab	94.4 b	15.5 c	4.41 bc	0.65
1.2	20.5 a	16.4 a	17.2 a	126.7 a	32.0 a	6.01 a	0.79
1.6	20.0 a	16.8 a	17.6 a	102.7 a	29.7 a	5.48 ab	1.17
2.0	18.5 b	15.0 b	16.5 ab	91.0 b	29.0 a	4.86 b	0.99
2.4	19.5 ab	16.8 a	17.0 a	101.7 a	22.0 b	4.95 b	0.91
3.6	18.0 b	16.8 a	15.7 b	87.7 b	19.5 b	4.77 b	0.85

[z]Mean separation within columns by Duncan's multiple range test, significant at 5% level.

Abou-Hadid 등(1996)은 상추수경재배에 적합한 배양액의 EC가 1.0~1.5 mS · cm^{-1}이고, Cresswell(1991)는 2.0 mS · cm^{-1}라고 했다. Varley 등(1981)은 결구상추에 알맞은 EC범위는 매우 좁은 편으로 1.5~1.8 mS · cm^{-1}이고 1.8 mS · cm^{-1}이상의 고농도에서는 식물체가 왜소하고 잎이 딱딱해지며, 1.5 mS · cm^{-1}이하의 저농도에서는 K결핍과 함께 하엽이 황화된다고 하였다. 이처럼 연구자의 결과가 약간씩 차이가 있는 것은 품종과 연구 지역의 환경과 밀접한 관계가 있기 때문으로 보인다.

본 실험에서는 잎상추 수경지배에 있어서 품질과 생산성을 고려한 적정 배양액 농도는 EC 1.2~1.6 mS · cm^{-1}가 적합한 것으로 보였다.

적 요

본 실험은 상추 수경재배시 지하부 환경요인이 상추의 생육에 미치는 영향을 바탕으로 식물공장에서 활용가능성이 큰 상추의 최적 근권환경을 알아보고자 수행하였다. 근권부 환경조건으로는 배양액의 pH와 EC를 각각 여러 가지 수준으로 실험하였다. pH 3.0을 제외한 pH 4.0~8.0에서 가시적인 생리장해 없이 양호한 생육을 나타냈으나 광합성, 증산량 및 무기이온 흡수를 고려한 상추의 최적 배양액 pH는 pH 5.5~6.0였다. 배양액의 전기전도도는 0.8~3.6 mS · cm^{-1}로 처리하였을 때, 고농도에서는 Ca결핍으로 인한 잎끝마름증이 나타나 품질이 저하되었고 생육과 광합성이 높은 EC 1.2~1.6mS · cm^{-1}가 최적인 것으로 나타났다. 이런 결과는 상추 식물공장에서 상추의 주년생산, 공장적 대량생산 및 청정생산 등의 효율적인 재배를 하는데 기여 할 수 있을 것으로 보인다.

인용문헌

1. Abou-Hadid, A.F., E.M. Abd-Elmoniem and M.Z. El-Shinawy. 1996. Electrical conductivity effect on growth and mineral composition of lettuce plants in hydroponic system. Acta Hort. 434:59-66.
2. Adams, P. 1992. Crop nutrition in hydroponics. Acta Hort. 323:289-305.
3. Bres W. and L.A. Weston. 1992. Nutrient accumulation and tipburn in NFT-grown lettuce at several potassium and pH levels. HortScience 27(7):790-792.

4. Cramer, G.R., A. Lauchi and V.S. Polito. 1985. Displacement of Ca^{2+} by Na^{+} from the plasmalemma of root cells. Plant Physiol. 79:207-211
5. Cresswell, G.C. 1991. Effect of lowering nutrient solution concentration at night on leaf calcium levels and the incidence of tipburn in lettuce(var. Gloria). J. Plant Nutrition 14:913-929.
6. Diatloff, E. 1994. pH-What does it really mean?. Practical hydroponics and Greenhouses. (7/8):17-20.
7. Ehret, D.L. and L.C. Ho. 1986. Translocation of calcium in relation to tomato fruit growth. Ann. Bot. 58:679-688.
8. Epstein, E. 1966. Dual pattern of ion absorption by plant cells and by plant. Nature 212:1324-1327.
9. Graves, C.J. 1983. The nutrient film technique. Hort. Rev. 5:2-44.
10. 位田藤久太郎. 1982. 水耕栽培法に關する諸問題[5]-水耕液のpH管理. 農業および園藝. 57(2):327-331.
11. Ho, L.C. and P. Adams. 1995. Nutrient uptake and distribution in relation to crop quality. Acta Hort. 396:33-44.
12. Ho, L.C. 1995. 國際園藝作物研究所における養液栽培研究の20年. ハイドロポニックス. 9(1):30-33.
13. Holder, R. and M.H. Christensen. 1988. Effect of EC on the growth, yield and composition of cherry tomatoes grown in rockwool. ISOSC Proc. 7th Int. Congr. Soiless culture. Wageningen.p. 213-227.
14. 남정령. 1998. 잎상추와 반결구상추에 적합한 배양액 개발과 근권내 고농도 철공급에 의한 엽내 철함량이 증가된 엔디브 생산. 서울시립대학교 대학원 석사학위논문.
15. Sonneveld, C. 1993. An overview of nutrition in hydroponics. Australian hydroponic conference - Hydroponics and the environment. Monash Univ. Melbourne, Australia p.21-36.
16. Varley, M.J. and S.W. Burrage. 1981. New solution for lettuce, Grower. 95:19-25.
17. 山崎肯哉 1981. 養液栽培全編 博友社 p.51-52.