

## 토마토의 양액재배시 Programmable Logic Controller에 의한 pH와 EC의 자동조절

김형준 · 김진한\* · 남윤일  
원예연구소, \*충북대학교 원예학과

### Automatic Control of pH and EC by Programmable Logic Controller in Nutriculture of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)

Kim, Hyoung-Jun · Kim, Jin-Han\* · Nam, Yooun-il  
National Horticultural Research Institute, RDA  
\*Chungbuk National University, Cheongju 360-763

#### Abstract

Using the programmable logic controller (PLC), a kind of microcomputer, a facility to control EC and pH automatically in nutriculture of tomato was developed. A program for the automatic control of nutriculture was written in ladder diagram language.

EC and pH levels of nutrition solution could be maintained at 1.70 ~ 1.72 and 6.1 ~ 6.5, respectively, during the entire growing period. Better fruits and higher yield were obtained in automatic control plot than in the control plot. Inorganic elements in plant were higher in the former than in the latter.

키 워 드 : 토마토, 자동조절, EC, pH, 수경재배

Key words : tomato, automatic control, EC, pH, nutriculture

## 서 언

양액재배는 세계적으로 각광을 받고 있으나 우리나라에서는 아직 발달 초기상태에 있다. 특히, 시설원예는 특수한 환경하에서 재배되고 있기 때문에 노지재배에서 볼 수 없었던 염류집적과 연작장해, 병충해가 다발하고 이로 인하여 작황 및 수량과 품질이 불안정하게 되며 더욱이 토양이 오염되면 앞으로 양액재배의 필요성은 더해 갈 것이다<sup>7)</sup>.

양액재배의 특징은 양분의 농도를 쉽게 변경할 수 있는 편리한 점이 있으나, 토양이 갖는 완충능이 감소되는 조건하에서의 재배이므로 항상 작물의 생육에 합치되는 배양액의 관리가 필요하다.

배양액은 작물의 종류별, 생육시기별로 배양액의 조성을 다르게 할 필요성이 있으므로 이 방면의 연구가 활발하게 진행되어 왔다.<sup>3,4)</sup> 특히, 양액의 EC와 pH는 식물체가 성장하면서 양분을 흡수하기 때문에 수시로 변하여 양액재배에 있어서 커다란 문제의 하나이다.<sup>14)</sup>

외국의 경우, 양액의 EC와 pH 및 이온의 자동 조절에 관한 연구가 이루어지고 있으나,<sup>4)</sup> 우리나라에서는 양액성분에 대한 작물 생육반응 연구가 주를 이루었으며<sup>2, 5, 6)</sup> 우리나라 재배 농가의 대부분은 계측에 의하여 양액의 농도를 조절하지 못하고 일정 비율 내지 일정 간격으로 양액을 보충하거나 며칠 간격으로 양액 전체를 교환해 주고 있는 실정이므로<sup>6)</sup> 작물의 수량과 품질이 저하되는 원인이 되나 이 방면의 연구는 거의 전무한 상태이다.

자동화 장치를 가지고 양액의 EC와 pH를 연속적으로 측정하여 양액관리를 하면 정확성이 있고 생력화가 되며, 생산성 향상과 고품질 농산물을 기대할 수 있다.

그러므로, 본 연구에서는 현재 우리나라에서 널리 보급되어 있는 담액수경에 있어서 양액관리가 쉽지 않은 과채류중 토마토 재배 양액의 EC와 pH의 조절을 자동화하기 위하여 마이크로컴퓨터의 일종인 PLC(programmable logic controller)를 사용하였으며 하드웨어와 소프트웨어를 개발하고 재배 시험을 실시하여 양액관리의 정확성 및 생력화를 이룩하고, 토마토의 생산성 향상과 고품질 상품을 수확할 수 있는 기초자료를 얻기 위하여 실시하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 양액재배 장치

본 실험에 사용된 자동화 장치는 공장 자동화에 사용되고 있는 PLC로서 일본 Omron사의 C200H를 사용하였다. PLC의 구성은 CPU(145개의 명령어를 가지고 있고, 최대 수용 프로그램용량은 6,974 word이며 내부 보조릴레이는 3,296개이며, 입출력릴레이는 480개까지 수용할 수 있다)와 메모리(8kWord), Output card(48접점), Input card(32접점), Analog/digital card(4접점), Temperature card(4접점), Link unit(RS422)로 되어 있다. 온도센서는 pt100Ω을 사용하였으며, EC센서는 HANNA Instrument사의 HI7635를 사용하여

EC전송기를 거쳐 4~20mA가 출력되게 하였으며 pH센서 또한 HANNA사의 HI1210S를 사용하여 pH전송기를 거쳐 4~20mA가 출력되게 하였다. 수위센서는 국산으로 서진레벨의 Float식 SLI를 사용하여 4~20mA가 출력되게 하였다.

양액재배 방식은 DFT식으로 하였으며 베드의 크기는 가로190 × 세로60 × 높이25cm이었다. 배양액의 산소 공급을 위하여 펌프작동은 시간당 15분씩 가동시켰다. 양액탱크는 600ℓ FRP 노랑색 물탱크로 stock solution의 용기는 20ℓ 물통을 은색으로 도색하였고 물통 밑에 커플링(16mm)을 부착하여 solenoid valve와 연결하였다. solenoid valve는 강산, 강알카리에도 사용할 수 있는 PVC valve로써 CKD/M-04-2pv-3을 사용하였다. 이와같은 시스템을 운영하는 PLC program 언어는 ladder diagram으로써 Omron사의 LSS(ladder support software)로 작성하여 RS422로 통신하여 PLC에 입력시켰다.

### 2. 작물재배 및 조사방법

본 실험에 사용된 작물은 토마토(서광, *Lycopersicon esculentum* MILL. : 홍농종묘)로써 1993년 8월 26일에 파종하였으며, 1993년 10월 5일 베드에 10주씩 완전임의배치 3반복으로 정식하였다. 적심은 5화방에서 하였고, 수확은 93년 11월 하순부터 94년 2월 하순까지 실시하였다.

수량조사는 1주에 1회하였으며 수량 및 개체중량을 측정하였다. EC 및 pH의 실측 측정은 12월 1일부터 2월 30일까지 매일 10시와 16시에 하였으며 처리구에서는 1시간 30분에 한번씩 데이터 메모리에 저장하게 하였다. 관행구의 물의 보충은 3일에 한번 실시하였다.

본 실험에 사용된 배양액의 조성은 Hoagland and Arnon액<sup>16)</sup>을 사용하였다. stock solution은 100배액으로 A와 B액으로 나누어 침전이 생기지 않게 하였으며 pH 교정액은 산은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 알카리는 NaOH를 각각 1N액을 사용하였다.

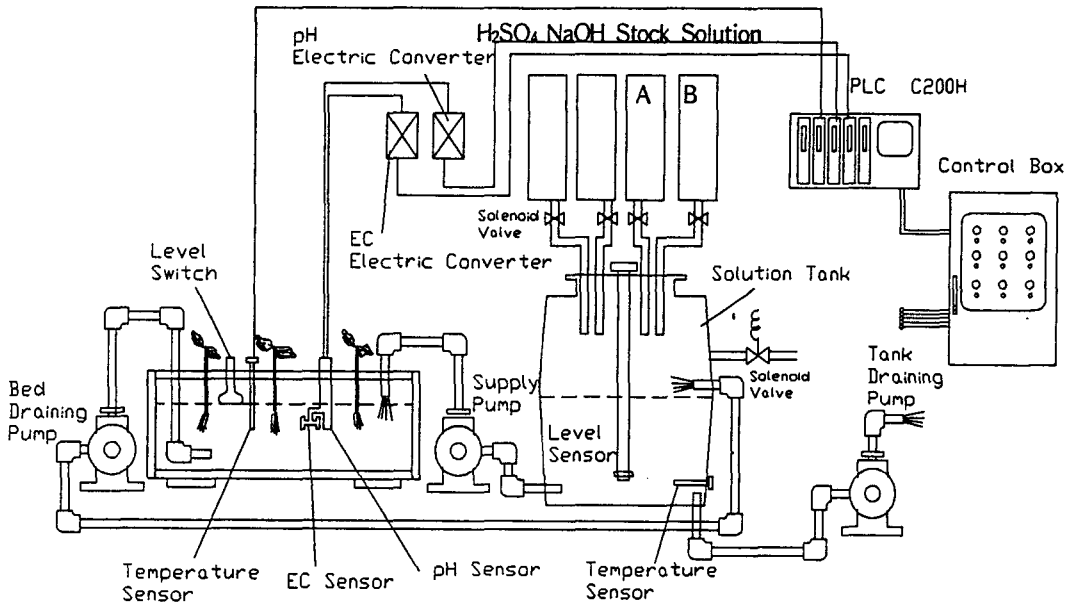


Fig. 1. Diagram of hydroponic system.

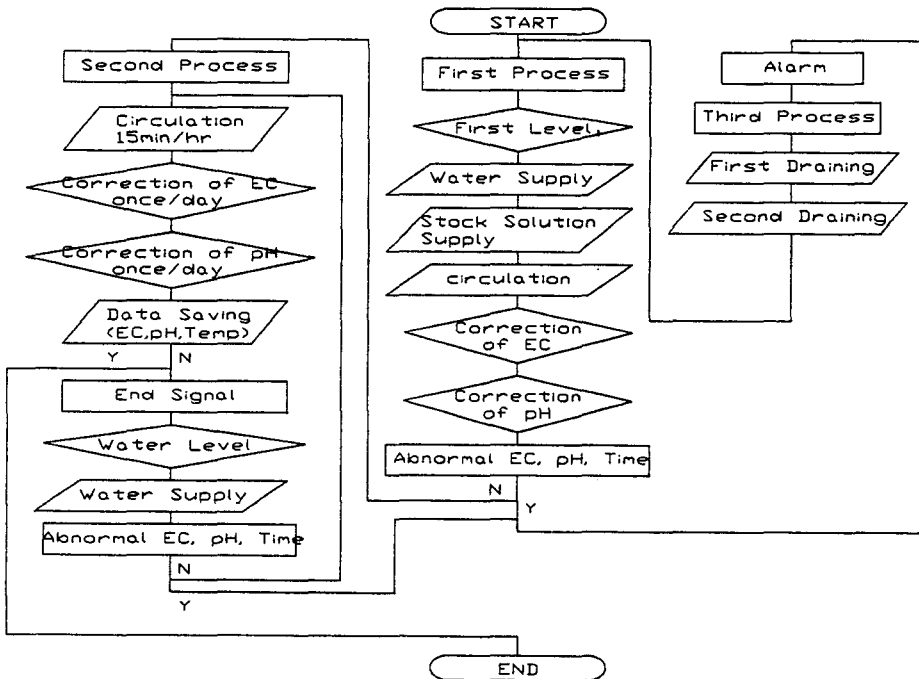


Fig. 2. Flow chart for nutrient solution control

배양액의 EC는 PLC자동처리구에서는 1.7mS/cm로 유지시켰으며 대조구에서는 일반 농가 관행으로 일정 시간 경과후 다시 1.7mS/cm로 조정하여 주었는데 본 실험에서는 그 일정 시간을 EC 1.4mS/cm로 정하였으며, 이때 pH의 교정도 함께 하였다.

광합성 및 기공저항은 휴대용 광합성 측정장치(Li-cor 6200)를 이용하였으며 엽면적 측정은 Li3100(Li-cor), EC meter는 TOA CM-205, pH meter는 orion 520을 사용하였다.

과실의 당도는 brix 당도계를 사용하였으며, 산도는 0.1N의 NaOH로 적정한 수치를 계산식에 적용시켜 측정하였다.

무기물 분석은 식물체를 70°C에서 3일 건조하여 분쇄한 후 Perchloric acid로 분해한 시료를 분광광도계(Spectronic 601)를 이용하여 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>는 Vanadate법에 의한 비색법(470nm), total nitrogen은 Indophenol-blue법에 의한 비색법(665nm)측정을 하였으며, Ca, Mg, K는 Atomic Absorption Spectrophotometer(Perkin Elmer 3300)를 이용하여 분석하였다

## 결과 및 고찰

### 1. 양액재배자동화 장치 하드웨어 및 소프트웨어 개발

본 실험을 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 양액재배 시스템에 강제순환방식을 채택하였다. 양액농도 제어용 EC, pH, 수위센서의 신호는 4~20mA로 변환된 다음 PLC에서 분해능이 4~20mA/4000인 Analog card로 입력되어 메모리에 입력, 저장되게 하였다. 측정된 값은 그후 데이터메모리의 수치와 비교 판단한 후 프로그램의 순서에 의하여 펌프 및 solenoid valve를 작동시켜 양액의 EC, pH, 탱크 수위를 프로그램상의 수치와 일치시키도록 구성하였고, Solenoid Valve의 작동시간은 1초로 하였다.

데이터 입력시 예리수치가 들어오면 탱크

배수 펌프로 모든 양액을 배수시키고 새로운 물을 받아서 다시 양액을 조제시키게 하였으나 실험이 종결될 때까지 이러한 상황은 발생하지 않았다. PLC는 일반 컴퓨터(byte machine)와는 달리 word machine이어서 운영 소프트웨어에 차이가 있다. 전통적으로 PLC에서 많이 사용되는 프로그램은 ladder diagram과 mnemonic인데, 본 실험에서는 사용한 언어는 ladder diagram이었다.

양액재배 시스템의 제어 알고리즘은 모든 공정을 세부분으로 나누었고, 상호 유기적 관계를 가지도록 개발하였다(Fig. 2).

제1공정은 최초 시작 공정이자 이상상태 발생시 재 시작 공정으로서 양액탱크와 배드내에 충분한 물을 채운후 순환을 시키고 물의 순환중에 4분에 1초씩 100배액의 stock solution의 solenoid valve가 열려서 배양액의 EC가 조절된 후, pH가 산과 알칼리용액으로 조절 되도록 하였다.

이때 EC, pH, 시간의 이상수치가 입력되면 제1공정이 중단되고 즉시 제3공정이 진행되도록 하였다. 제3공정은 시스템내의 모든 양액을 밖으로 배출시키는 세척공정으로서 첫번째 배수가 끝난후에 파이프 바닥에 남아있는 잔량의 양액을 없애기 위하여 두번째 배수가 이루어지게 되고 이 공정이 끝난후 다시 제1공정으로 돌아가서 양액을 조제하도록 하였다.

제1공정에서 이상없이 양액의 EC, pH가 맞추어지면 제2공정으로 넘어가 정상적으로 1시간에 15분간 양액이 순환하게 된다. 물이 보충될 때는 데이터 메모리에 있는 수위조절 데이터와 비교하여 부족분만 공급하도록 하였다. 하루에 한번 아침 8시에 EC 및 pH에서 입력되는 4~20mA의 Analog값을 4000으로 나누어서, 0000~0FA0(0000~4000)와 같은 16진수로 바꾸어서 메모리에 입력시키면 EC 및 pH의 기준 수치인 01D4~01E4(468~484, 1.70~1.72mS/cm), 05A1~05E1(1441~1505, pH 6.1~6.5)와 비교하여 이를 교정하게 된다. 이때 제1공정과 마찬가지로 이상수치가 입력되면 제2공정은 즉각 중지되고 제3공정으로 이동하게 된다.

2. 양액재배 자동화에 의한 양액의 EC, pH변화와 작물생육반응

프로그램에 의하여 조절된 EC와 pH의 변화는 기준으로 정한 EC 1.70~1.72mS/cm, pH 6.1~6.5의 범위에서 크게 벗어나지 않고 잘 조절이 되었다(Fig. 3). 그러나 pH의 변화폭은 산기<sup>10)</sup>도 보고한 바와 같이 변화폭이 컸으며 조절범위를 벗어난 시기도 많았음을 볼 수 있었다. 실제로 조절상태를 확인하기 위해 1시간30분 마다 PLC의 데이터 메모리에 저장된 Analog 입력 수치와 기준이 되는 EC와 pH 수치와 상당한 일치를 나타내어 양액의 조절이 성공적으로 이루어졌음을 보여 주고 있다(Fig. 4). 그러나 대조구의 EC 실측치를

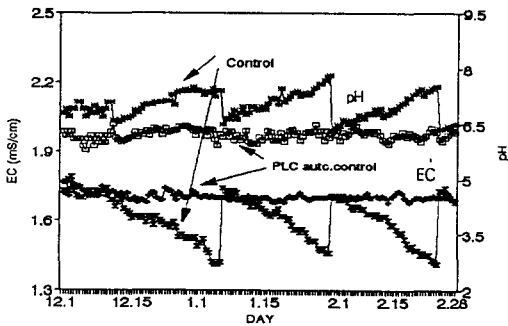


Fig. 3. Daily change of EC and pH controlled by programmable logic controller.

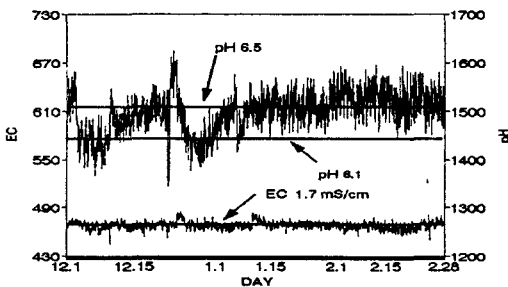


Fig. 4. Daily change of EC and pH in PLC data memory.

보면 양액의 소모만큼 물의 보충이 이루어져 점차 EC의 수치가 떨어지고 있음을 볼 수 있는데, 생육후기 일수록 일수가 짧아지고 있었다. pH의 경우에는 변화폭이 상당히 크면서도 수치가 점점 증가하는 것을 볼 수 있었다.

양액의 자동조절에 따른 토마토의 생육은 초장, 엽면적, 엽중, 경중 등 지상부의 생육은 대조구가 높았는데 지하부 즉 경직경 및 근중에 있어서는 처리구가 높았다(Table 1). 이들의 top/root(T/R), leaf/root(L/R), stem/root(S/R), leaf/stem(L/S)비는 처리구와 대조구에서 지상부와 지하부의 생육이 차이가 있었다(Table 2).

이는 배양액의 농도가 높은 배양액에서는 삼투압이 증가하여 지상부의 생육이 억제된다는 보고와 일치된다고 생각된다<sup>11)</sup>. 또한 지하부의 차이는 배양액 농도의 변화가 처리구에서는 변화폭이 작았으나 대조구에서는 그 폭이 심하여 지하부에 스트레스를 가한 것으로 생각된다.

토마토의 잎, 줄기, 뿌리 및 과실의 무기성분은 전질소와 인산은 모든 부위에서 석회는 잎, 뿌리, 줄기에서, 칼륨은 줄기와 과실에서 대조구보다 처리구가 높았다(Table 3).

이는 배양액의 EC가 증가하면 체내의 수분흡수가 억제되면서 질소, 인산, 칼륨등의 무기성분이 증가한것으로 사료되며<sup>10)</sup> 같은 결과로써 대조구에서는 농도의 저하로 수분의 흡수는 촉진되어 지상부의 양적 생장은 촉진되었어도, 양액의 농도가 저하함으로써 식물체내의 양분이 부족하여 무기양분의 농도가 저하된 것으로 생각되었다.

광합성 및 기공저항은 제5화방의 잎에서 측정하였는데 잎이 다소 노화된 상태였다. 광합성은 처리구에서 높게 나타났으며 기공저항은 대조구에서 높게 나타나서 가스의 교환이 원활히 이루어지지 못했음을 보여주고 있다(Table 4). 이와같은 결과는 이온강도가 낮은 편이 기공저항이 높았다는 의견과 일치하며<sup>15)</sup>, 대조구는 처리구에 비해 식물체의 무기성분이 부족하므로 잎의 노화가 빠르게 진전되어 생리작용이 둔화된 때문인 것으로 생각된다<sup>11)</sup>.

Table 1. Growth characteristics of tomato(mean±SE ).

Treatment	Plant height (cm)	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Fresh weight (g/plant)			Dry weight (g/plant)			Stem diameter (mm)
			Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root	
Control	162.1 ±2.68	7709 ±868.1	544 ±85.S2	272 ±17.1	256 ±17.1	64 ±5.90	39 ±3.60	17.5 ±1.42	13.5 ±0.70
PLC auto.control	156.8 ±6.58	7586 ±404.6	484 ±13.7	260 ±17.6	304 ±8.1	59.5 ±1.32	35.6 ±0.29	20.8 ±0.45	15.5 ±0.32

Table 2. The ratio of each partition in tomato(mean±SE).

Treatment	T/R ratio	L/R ratio	S/R ratio	L/R ratio
Control	6.8±0.34	3.6±0.32	2.21±0.075	1.64±0.137
PLC auto.control	5.43±0.19	2.96±0.14	1.720±0.025	1.67±0.032

Table 3. Mineral contents of tomato (mean ± SE).

Partition	Treatment	N(%)	P(%)	Ca(%)	Mg(%)	K(%)
Leaf	Control	2.16±0.098	0.87±0.106	3.58±0.100	0.82±0.069	3.86±0.226
	PLC auto.control	2.63±0.265	1.30±0.088	3.85±0.255	1.13±0.101	3.81±0.203
Stem	Control	1.32±0.044	0.79±0.105	1.59±0.125	0.86±0.085	2.58±0.242
	PLC auto.control	2.01±0.285	1.33±0.110	1.21±0.160	0.70±0.090	3.00±0.490
Root	Control	2.37±0.121	0.82±0.047	0.75±0.059	0.54±0.049	4.4±0.15
	PLC auto.control	2.91±0.208	1.08±0.052	0.77±0.112	0.58±0.063	4.5±0.67
Fruit	Control	1.63±0.134	0.87±0.043	0.201±0.013	0.226±0.013	4.25±0.178
	PLC auto.control	1.81±0.112	0.92±0.069	0.210±0.026	0.240±0.043	4.40±0.440

Table 4. Gas exchange parameters of tomato plant (mean ± SE, 29°C, photon flux density:800±40µmol/m<sup>2</sup>/s).

Treatment	Stomatal resistance (s/m)	CO <sub>2</sub> assimilation (µmol/m <sup>2</sup> /s)
Control	0.91±0.056	4.7±0.41
PLC auto.control	0.71±0.097	8.0±0.74

토마토의 수량과 상품성은 과실수에서는 처리구에서 다소 높고 평균과중 및 주당과중은 대조구에서 높은 수치를 나타내었다(Table 5). 시기별 과실의 수량은 초기에는 대조구에서 높은 수

량을 유지하였고, 생육후기는 처리구에서 높은 수량성을 유지하였다(Fig. 5). 이것은 대조구에서 생육후기 양분결핍에 의한 광합성 및 생리작용의 저하에서 기인되었다고 생각된다.

Table 5. Fruit yield of tomato (mean  $\pm$  SE).

Treatment	Yield		Average fruit weight (g)
	Fruit number /plant	Fruit weight (kg)/plant	
Control	15.60 $\pm$ 0.260	2.26 $\pm$ 0.125	145.0 $\pm$ 9.5
PLC auto.control	17.40 $\pm$ 0.42	2.41 $\pm$ 0.065	138.7 $\pm$ 7.1

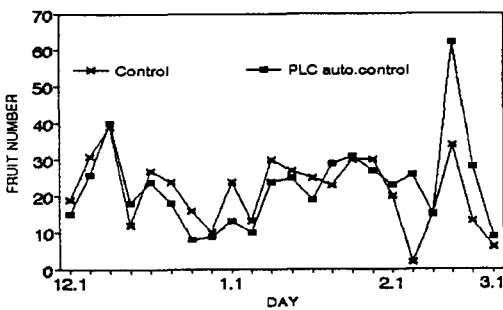


Fig. 5. Weekly changes in fruit number.

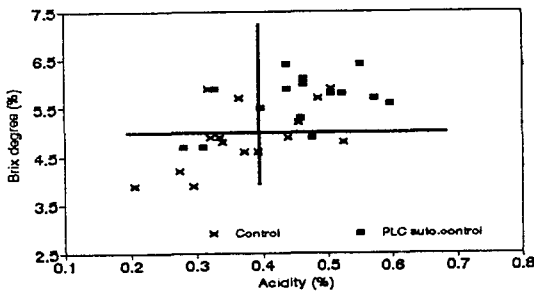


Fig. 6. Ratio of Brix degree and acidity in tomato fruit.

우전천<sup>13)</sup>는 배양액의 관리폭을 적게 한 것 일수록 각 화방의 착과수의 변동이 적고, 상품과율은 높은 반면 수량성은 떨어진다고 보고한 바 있는데, 본 실험에서는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 EC 및 pH의 변화폭을 적게 유지한 처리구가 착과수의 변동이 적고 당도 5.0oBrix, 산도 4.0% 이상의 상품과율이 높아,

일치하였으나 수량은 반대의 결과를 나타내었다. 그러나 EC가 0.8, 1.2mS/cm보다는 2.0mS/cm에서 수량이 많고 평균과중이 낮았다는 보고<sup>12)</sup>와는 일치하여 금후 검토가 필요할 것으로 생각되었다.

또한 본 실험에서는 토마토의 전생육기간동안 일정한 수치의 양액 농도를 유지시켰으므로 생육단계별 양액농도의 조절에 따른 작물의 생육반응과 아울러 환경 요소의 변화에 따른 양액의 조절에 대한 연구가 더욱 추진되어야 한다고 생각된다.

## 적 요

국내 원예시설의 증가와 더불어 양액재배농가도 증가추세에 있어 저렴한 국산 양액재배 자동화기기가 농가에 필요한 실정이다. 이에 따른 양액재배의 EC와 pH를 자동조절하기 위하여 마이크로컴퓨터의 일종인 PLC(programmable logic controller)를 이용한 장치를 개발하고 재배실험을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Ladder diagram언어를 사용하여 양액재배의 자동화 프로그램을 작성하였다.
2. PLC를 이용하여 양액의 EC, pH수준을 1.70~1.72mS/cm, 6.1~6.5로 전 생육기간동안 유지시킬 수 있었다.
3. 대조구에 비하여 처리구가 상품과(당도 5.0 oBrix, 산도 0.4% 이상) 및 수량성이 높은 결과를 얻었다.
4. 식물체의 무기성분 함량은 처리구가 대조구에 비해 전체적으로 높았다.

## 引用文獻

1. Chi, S.H., Y. Shinohara, and Y. Suzuki. 1991. Effect of concentration of nutrient solution on vegetative growth and fruit yield of hydroponically grown tomato plants. *Environ Control in Biol.(Japan)* 29(4):185-192.
2. 鄭淳柱, 徐範錫, 李範宣. 1992. 水耕栽培 토마토의 生長과 發育에 미치는 窒素와 칼리水準 및 相互作用에 관한 研究. *韓園誌* 33(3):244-251.
3. 羽藤堅治. 1990. 水耕栽培의 EC의 세트 포인트를 調整하는 엑스파트 시스템. *日本植物工場學會 平成2年度大會 symposium 및 學術發表* p.51-52.
4. Honjo, T. and T. Takakura. 1991. Identification of water and nutrient supply to hydroponic tomato plants by using neural nets. *IFAC/ISMS workshop on mathematical and control application in agriculture and horticulture* p.285-288.
5. 張炳春, 洪榮均, 全載哲. 1992. 水耕栽培에서 養液溫度가 菜蔬作物의 生長 및 無機養分吸收에 미치는 影響. *韓國土肥誌* 25(3):242-248.
6. 金文基, 南相運, 孫禎翼. 1991. 太陽에 너지를 利用한 植物生産 시스템의 養液栽培 環境調節에 關하여. *韓國農業機械學會誌* 16(2):178-187.
7. 李炳駟. 1993. 農業發展과 施設園藝産業의 役割. *國內施設園藝發展을 위한 심포지엄, 서울大學校 農業開發研究所* p.5-24.
8. 李應鎭, 朴尙根, 金光勇, 劉根培. 1993. 培養液의 NO<sub>3</sub>-N과 NH<sub>4</sub>-N의 比率이 오이의 生育 및 收量에 미치는 影響. *農業科學論文集* 35(2):390-395.
9. Okuya, A. and T. Okuya. 1991. Development of ion controlled feeding method in hydroponic. *IFAC/ISHS workshop on mathematical and control applications in agriculture and horticulture*, p.355-359.
10. 朴權瑠, 李龍範. 1988. 몇가지 水耕栽培法에 의한 園藝作物 生産과 經濟性 分析에 관한 研究. *學術振興財團研究報告書*.
11. Ryle, G.T.A. and J.D. Hesketh. 1969. Carbon dioxide uptake in nitrogen-deficient plant. *Amer. crop sci.* 9:451-454.
12. 佐佐木皓二. 1986. 水耕栽培(NFT를 除く) 現狀と問題點. *野菜·花き養液栽培의 現狀と今後の發展方向, 野菜試驗場* p.14-19.
13. 宇田川雄二. 1986. NFT式水耕栽培의 實際. *農業および園藝* 61(1):135-146.
14. 宇田川雄二. 1989. NFT. *植物生産 시스템實用辭典* p.272-286.
15. 梁元模, 鄭淳柱, 金龍斗. 1990. 噴霧耕과 薄膜循環養液栽培에 따른 토마토의 生理, 生態 및 形態的 適應에 관한 比較 研究, III. 生理-生態的 適應 特性. *韓園誌* 31(3) 226-237.
16. 山崎肯哉. 1982. 養液栽培全篇. 博友社.