

# 액체 정밀계량 장치를 이용한 액체 자동조제 시스템 개발<sup>+</sup>

## Development of Automatic Nutrient-Solution Control System Using a Low-Cost and Precise Liquid Metering Device

柳寬熙\*    洪淳昊\*\*    李奎哲\*    李正勳\*    黃鎬俊\*  
정희원    정희원    정희원  
K. H. Ryu,    S. H. Hong,    K. C. Lee,    J. H. Lee,    H. J. Hwang

### ABSTRACT

This study was conducted to develop an automatic nutrient-solution control system for small-scale growers. The nutrient-solution control system consisted of a low-cost and precise metering device and a personal computer. The system controlled electric conductivity(EC) and pH of nutrient-solution based on the time-based feedback control method with the information about temperature, EC, and pH of the nutrient-solution. The performance of the nutrient-solution control system was evaluated through the control of EC and pH while compared with those of commercial nutrient-solution control system. Also an experimental cultivation of tomato was conducted to verify and to improve the developed system.

Results of this study were as follows.

1. An automatic nutrient-solution control system based on a low-cost and precise metering device was developed.
2. The developed system controlled EC and pH within  $\pm 0.05$  mS/cm and  $\pm 0.2$  pH full scale error respectively at 24 °C.
3. When using the commercial system, the controlled values of EC and pH of the 500 l of water were 1.29 mS/cm and 6.1 pH for the setting points of 1.4 mS/cm and 6.0 pH respectively at 22 °C.
4. The developed nutrient-solution control system showed  $\pm 0.05$  mS/cm of deviation from the setting EC value over the experimental cultivation period.
5. The deviation from the average values of Ca and Mg mass content in the several nutrient-solution were 0.5% and 1.8% respectively.

**주요용어(Key Words)** : 자동제어(Automatic control), 양액(Nutrient-solution), 수경재배(Hydroponics), 피드백제어(feedback control)

+ 본 연구는 농림수산부의 1995년도 현장애로기술사업개발 연구비 지원으로 수행되었음.

\* 서울대학교 農業生命科學大學 農工學科

\*\* (주)마포산업전자

## 1. 서 론

양액재배는 재배관리, 재배환경, 식물생육의 관점에서 토양재배에 비해 우수하나 두 종류의 농축배양액을 사용하는 경우 두 양액의 토출량 편차가 발생하여 정밀한 양액제어가 어렵다는 단점이 있다. 또한 초기 시설비의 투자가 크고 재배자의 높은 지식수준을 요구하기 때문에 소규모 농가에서 양액재배를 채택하는데 어려운 점이 있다.

양액 조제 시스템은 조제 방식에 따라 직접 관로 투입 시스템, 혼합후 공급 시스템, 연속 혼합 시스템으로 나뉘며 각각의 특징 및 장단점은 다음과 같다.

직접 관로 투입 시스템은 별도의 양액 혼합 탱크가 없고, 양액 주입 펌프를 시간이나 유량으로 제어하여 농축된 양액을 주관로에 직접 투입하는 시스템으로 주관로 안에서는 양액의 농도와 산도가 불규칙할 수 있으나 긴 관로를 통과하여 베드에 공급될 때에는 설정한 양액의 농도와 산도로 조절되는 시스템이다. 이 시스템은 전기전도도 및 산도 센서와 제어를 사용하지 않으므로 다른 양액 조제 시스템에 비하여 가격이 다소 저렴한 편이나, 짧은 관로를 통과하여 혼합된 양액이 베드에 유입될 경우 양액의 농도와 산도의 편차가 커질 수 있으므로, 베드의 배지 용량이 큰 고행배지경 재배나 토양관비 재배 등에 주로 사용된다.

혼합후 공급 시스템은 큰 양액 혼합탱크를 필요로 하며 양액 혼합탱크에 부착되어 있는 전기전도도 및 산도 센서에 의해 필요한 양의 농축배양액을 공급하여 조제한 후 배지에 공급하는 시스템으로 재배 면적이 클 경우 혼합탱크의 용량 및 혼합시간이 커져야 되므로 소규모 면적에서 사용하기에 적합하다고 볼 수 있다. 이 시스템에 있어서 양액 혼합은 농축배양액 공급시간 혹은 유량 센서에 의해 제어할 수 있으므로, 폐양액 회수처리 시스템이 아닌 경우 EC나 pH센서에 의한 제어로 인한 시스템 가격 상승이 우려될 경우 시간과 유량에 의한 양액 혼합방법을 사용할 수 있다.

연속 혼합 시스템은 200ℓ 정도의 혼합탱크가 부착되어 있는 시스템으로 시간, 유량 및 각종 센서에 의해 양액의 농도와 산도를 조절하면서 공급하며, 재배면적에 상관 없이 양액의 농도와 공급횟수를 다양하게 제어할 수 있는 시스템으로 현재 대규모 고행배지경 재배에 많이 보급되고 있다.

오길근(1995)은 HANNA 사의 정량펌프를 이용하여 양액 자동조제 장치를 개발하여 양액의 온도, 농도, 산도를 제어한 결과 각각  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 0.2\text{ mS/cm}$ ,  $\pm 0.1\text{ pH}$ 의 오차 범위 내에서 제어하였다. Okano 등(1988)은 순환식 샘플제어 시스템을 개발하여 상추를 재배한 결과 전기전도도  $1.2(\pm 0.1)\text{ mS/cm}$ , 산도  $6.0(\pm 0.5)\text{ pH}$ 로 양액제어를 수행하였다.

본 연구의 목적은 정밀 농축배양액 공급에 의한 양액 자동조제 시스템을 개발하기 위한 것으로서 그 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 자체 개발된 액체 정밀계량 장치, 각종 검출장치 및 제어용 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 양액 자동조제 시스템을 개발한다.
2. 개발된 양액 자동조제 시스템의 조제 성능 평가를 위해 양액의 농도 및 산도제어 실험을 수행 한다.

3. 상용 양액 자동조제 장치의 농도 및 산도제어 실험 결과와 개발된 양액조제장치의 제어 실험 결과를 비교하여 개발된 양액 조제 장치의 성능을 평가한다.
4. 개발된 양액 자동조제 시스템을 이용한 실증제배를 수행하여 장치의 신뢰성을 검증한다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 양액 자동조제 시스템의 구성

자체 개발한 액체 정밀계량 장치와 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 양액 자동조제 시스템을 구성하였는데 시스템의 설계시 고려사항은 다음과 같다.

1. 정밀한 양액 조제가 가능할 것
2. 시스템을 구성하는 부품들의 가격이 저렴할 것
3. 계측장치의 착탈을 용이하게 하여 보수가 유리할 것
4. 개발된 시스템의 신뢰도가 높을 것

#### (1) 계측시스템

양액의 상태를 검출하기 위하여 온도, 전기전도도, 산도 등 세 가지 물리·화학적 성질을 계측하였다. 계측된 각각의 신호는 신호변환기를 거쳐 4~20 mA의 전류신호로 변환되며 다시 1~5 V의 전압형태로 바뀐 뒤 12 비트 A/D 변환기로 입력되어 퍼스널 컴퓨터를 이용한 계측상태 모니터링 시스템의 자료로 활용하였다.

양액의 온도를 검출하기 위하여 측온저항체 방식의 소자를 사용하였다. 이 방식의 소자는 온도에 따라 금속의 전기저항이 달라지는 현상을 이용한 것으로, 별도의 보상장치를 부착하지 않아도 절대적인 온도의 측정이 가능하기 때문에 상온범위에서의 정밀측정에 유리하다. 측온저항체의 재질로는 백금, 구리, 니켈 등이 사용되고 있으나, 기준온도에서의 저항치는 각각 다르다. 본 연구에서는 정확도와 재현성이 우수하며, 내구성이 매우 높은 백금저항선 방식을 이용한 Pt-100을 사용하였으며 신호처리를 위하여 코닉스사의 KH-2110 트랜스미터를 선정하였다. 사용된 트랜스미터의 분해능은 0.1 °C이고 정밀도는  $\pm 0.1$  °C이며 4~20 mA의 출력을 갖는다.

양액의 농도는 전기전도도 방식의 소자를 이용하여 측정하였다. 이 방식의 소자는 양액 중에 포함된 무기양분의 농도와 비례하여 두 전극 양단의 전위차가 변화하는 특성을 이용한 것으로 4개의 스테인레스 금속링을 에폭시 축에 감아서 전압강하를 측정한다. 특히 이 소자는 고농도에서 전류의 양이 과다하여 발생하는 분극현상을 막아 넓은 범위의 측정이 가능하여 사용자 부주위로 인한 센서검출기의 오동작을 막을 수 있다. 검출셀을 통과한 전류는 교류신호이므로 이를 전압 형태로 변환하고 다시 정밀 직류회로에 의해 직류로 변환하는 일련의 과정을 수행하기 위하여 HANNA사의 HI943500 신호변환기를 사용하였다. 실험에 사용된 신호변환기의 측정범위는 0~19.99 mS/cm이고 분해능은 0.01 mS/cm, 정밀도는  $\pm 2\%$  F.S.이며 4~20 mA의 출력신호를 갖는다.

양액의 산도는 유리전극 방식의 소자에 의하여 측정된다. 유리전극 방식의 소자는 용액의 조성이나 온도에 무관하게 일정한 전위를 나타내는 기준전극과 유리전극간의 전위차에 의하여 산도를 측정하는 것으로 측정 소요시간과 전자회로 결합에 의한 자동화의 용이성, 정밀도, 정확도 등의 잇점이 있다. 센서 전극간의 기전력 신호 처리 및 자동 온도보상 등을 갖춘 신호변환기로 HANNA사의 HI8710을 사용하였다. 사용된 신호변환기는 0~14 pH의 측정범위를 가지며 분해능은 0.01 pH, 정확도는  $\pm 0.02$  pH이고 4~20 mA의 출력을 갖는다.

## (2) 제어 시스템

위에서 설명한 소자들로 부터의 출력값과 양액의 농도 설정 및 산도 등의 설정값에 의해 양액을 자동조제할 수 있는 양액 자동조제용 제어 시스템은 퍼스널 컴퓨터와 A/D input/output board로 구성된다.

사용된 A/D input/output board는 AXIOM사의 AX5411로서 12비트 16채널의 A/D converter와 24개의 DIO 채널을 가지고 있다. 그림 1에 퍼스널 컴퓨터를 이용한 양액 자동조제 시스템의 구성도를 나타내었으며 그림 2에 전체 회로도를 나타내었다.

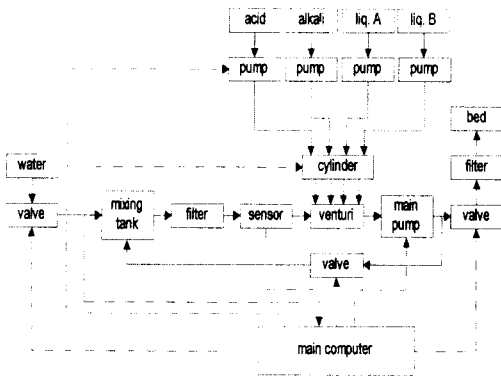


Fig. 1 Schematic diagram of the nutrient-solution control system.

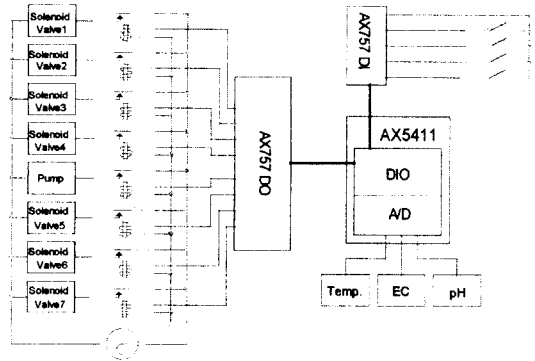


Fig. 2 Circuit diagram of the nutrient-solution control system.

양액 자동조제 시스템은 양액 자동조제용 소프트웨어를 이용하여 원하는 농도 및 산도의 양액을 편리하게 조제 가능하도록 되어있다. 그림 3에 개발된 소프트웨어의 흐름도를 나타내었다.

전기전도도는 0.1~9.9 mS/cm 범위에서 설정 가능하도록 하였으며 전기전도도 센서의 특성을 고려하여  $\pm 0.05$  mS/cm의 사역범위를 두었다. 농도 제어 방식은 초기에 설정치의 50%에 도달하도록 농축배양액을 공급한 후 도달 정도를 판단하여 다음 목표치를 결정하게 하여 일정 범위의 농축배양액 농도변화에서도 안정된 농도제어가 가능하도록 하는 피드백(feedback) 방식을 적용하였다. 이러한 제어의 프로그램화 과정을 그림 4에 순서도로 나타내

었다.

산도의 제어방식은 농도의 제어방식과 동일하나 액체의 투입량에 따른 산도값의 변화를 2차함수로 회귀하여 적용하였으며 산도 설정범위는 0.1~9.9 pH로 하였고 사역범위는  $\pm 0.2$  pH로 하였다.

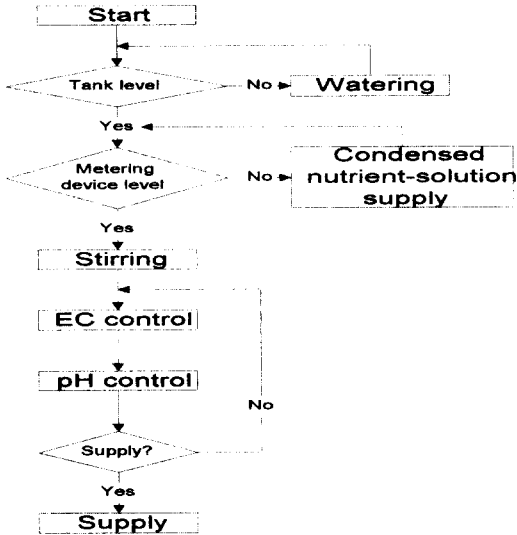


Fig. 3 Flowchart of the program for operating the automatic control system.

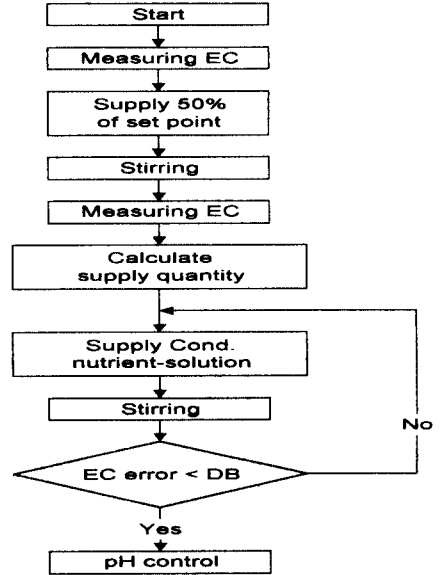


Fig. 4 Flowchart of the EC control.

#### 나. 양액 자동조제 장치의 제작

탱크 내부에서 농축배양액이 혼합되고 양액의 계측이 이루어졌던 기존의 방법을 수정하여 배관내에서 양액의 혼합 및 계측이 이루어지도록 하여 센서의 교정 및 교체가 유리하도록 하였으며 펌프, 여과기 등을 프레임에 부착할 수 있는 형태로 하여 상품화가 용이하도록 하였다. 또한 두 개의 전자밸브로 유체의 방향을 제어하여 한 개의 펌프로 교반 및 공급이 가능하도록 하였다. 전체 시스템의 외형을 그림 5에 나타내었다.



Fig. 5 Overview of the automatic nutrient-solution control system.

## 다. 성능실험

개발된 양액 자동조제 시스템의 성능평가 항목은 전기전도도 및 산도이며 각각 1회 및 연속 조제시 제어성능을 평가하도록 하였다. 또한 상용의 제품과 비교를 위하여 네타핌(NETAFIM, Italy)사의 양액 조제 시스템에 대한 조제 성능실험을 수행하였다.

농축배양액의 농도를 200배액으로 하여 전기전도도의 제어를 수행하였는데 이렇게 하면 농축배양액의 조제 횟수를 줄여 노동투하량을 줄일 수 있으며 용액의 침전현상을 방지할 수 있다. 산도의 제어는  $H_2SO_4$ 와  $KOH$ 용액을 사용하였다. 연속 혼합 방식을 이용하는 상용의 양액 조제장치의 실험은 연속적으로 공급되는 양액이 배지에서 누적되는 형태로 작물이 흡수한다고 가정하여 50ℓ 씩 10회에 걸쳐 조제한 결과를 각 표본의 전기전도도 및 산도값과 그 값의 누적 평균값을 확인하는 방법으로 수행하였다.

## 라. 실증재배

개발된 양액 자동조제 장치를 이용하여 50평 규모의 venlo형 유리온실내에서 'pepe'(일본, Takii 종묘) 방울토마토를 공시작물로 실증재배를 하였다. 재배방식은 암면경으로 하고 배양액조성은 Florida 토마토용 배양액으로 전기전도도 1.4 mS/cm로 설정하였다. 종자는 8월 4일 파종하였으며 본엽이 4~5매인 9월 1일 암면육면체에 이식하였다. 암면육면체에 이식 후 150×150×30 cm의 비닐상자내에 관리하였으며, 9월 13일 재배상용 암면 슬라브에 정식 하였다.

우리 나라의 경우 수경재배 작물 중 가장 많은 것이 잎상추이고, 그 다음이 토마토인데 이는 토마토가 다른 열매채소류 작물에 비해 물에 대한 환경적응성이 높아 재배가 용이하기 때문이다. 반면에 토마토는 영양생장과 생식생장을 균형 있게 관리하지 않으면 고품질 다수확을 기대하기 어려운 특성을 지니고 있어서 배양액의 조성과 농도관리가 중요하다. 따라서 개발된 양액 자동조제 장치의 조제 성능 평가를 확인할 수 있는 작물로 방울토마토를 사용하였다. 전 실증재배 기간에 걸쳐 농도 변화에 대하여 조사하도록 하였고 양액의 질량분석을 통하여 개발된 시스템의 안정성 및 신뢰성을 확인하고자 한다. 질량분석은 농축배양액에서 당량비가 높아 A액과 B액을 대표할 수 있는 Ca과 Mg을 대상으로 하여, 원자 흡광 광도계를 이용하여 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 가. 전기전도도

개발된 양액 자동조제 시스템의 양액조제 성능을 평가하기 위하여 전기전도도 제어를 수행하였으며 그림 6에 성능 곡선을 나타내었다. 양액의 농도는 24℃에서  $\pm 0.05$  mS/cm의 오차 범위 내에서 제어되었으며, 0.8 mS/cm에서 1.4 mS/cm까지 조제하는데 걸린 정정시간은 15분이었다.

상용 양액 자동조제 시스템과의 조제성능 비교를 위하여 네타핌사의 제품에 대한 전기전

도도 제어성능을 조사하였으며 그림 7에 성능곡선을 나타내었다. 계열1은 50 l에 대한 평균 전기전도도 값이며 계열2는 50 l씩 누적한 전기전도도 값의 평균값이다. 양액의 온도가 22 °C이고 설정치를 1.4 mS/cm로 하였을 때 500 l에 대한 누적 평균이 1.29 mS/cm로 나타났다.

결과에 나타난 바와 같이 개발된 양액 자동조제 시스템이 상용의 시스템에 비하여 조제 성능이 우수하였다. 개발된 시스템은 작물에 일정한 농도의 양액을 공급하지만 상용 시스템은 그림 7의 계열1에서 처럼 양액농도의 변화가 심하므로 작물의 정상적인 성장을 보장하기 위해서는 고품배지와 같이 완충역할이 가능한 배지가 필요하다고 여겨진다.

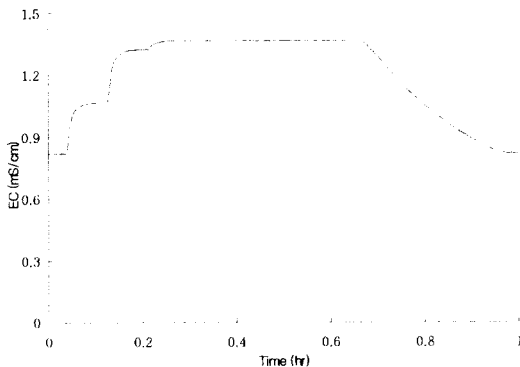


Fig. 6 Performance of EC control for the nutrient-solution control system developed.

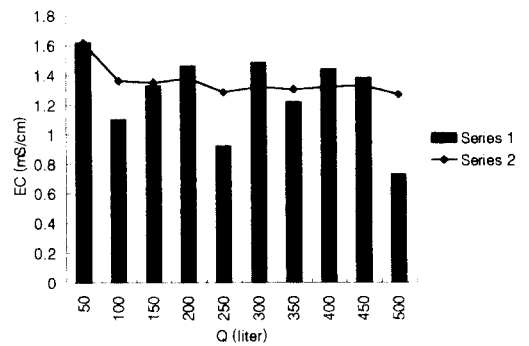


Fig. 7 Performance of EC control for the commercial nutrient-solution control system.

#### 나. 산도

개발된 양액 자동조제 시스템의 양액 조제성능을 평가하기 위하여 산도 제어를 수행하였으며 그림 8에 성능곡선을 나타내었다. 양액의 산도는 24°C에서 ±0.2 pH의 오차 범위 내에서 제어되었으며, 6.4 pH에서 6.0 pH까지 조제하는데 걸린 정정시간은 15분이었다. 상용 네타팜사의 제품에 대한 산도 제어성능을 조사하였으며 그림 9에 성능곡선을 나타내었다. 계열 1은 50 l에 대한 평균 산도 값이며 계열2는 50 l씩 누적한 평균 산도 값이다. 양액의 온도가 22 °C이고 설정치를 6.0 pH로 하였을 때 500 l에 대한 누적 평균이 6.1 pH로 나타났다. 하지만 사용제품에서 나타난 ±0.1 pH의 오차는 완충작용을 가정했을 때 얻어진 값으로 그림 9의 계열 2에서처럼 양액을 50 l씩 공급한다면 산도의 변화가 매우 심하여 상용제품을 사용할경우 작물의 정상적인 성장을 보장하기 위해서는 고품배지 등의 완충역할이 가능한 배지가 필요하게 된다.

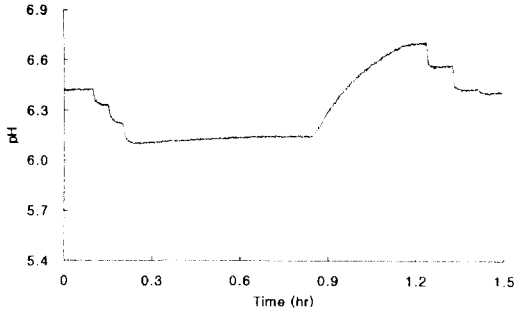


Fig. 8 Performance of pH control for the nutrient-solution control system developed.

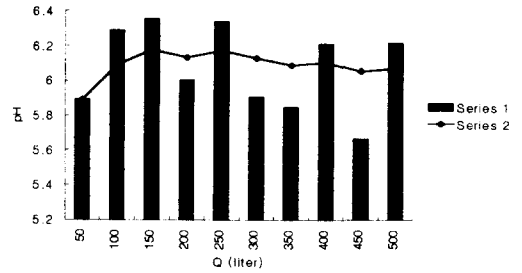


Fig. 9 Performance of pH control for the commercial nutrient-solution control system.

그림 10는 개발된 양액 자동조제 장치를 이용한 전기전도도 및 산도의 반복실험 결과를 나타낸 것으로 전기전도도 및 산도의 재현성이 우수하게 나타났다.

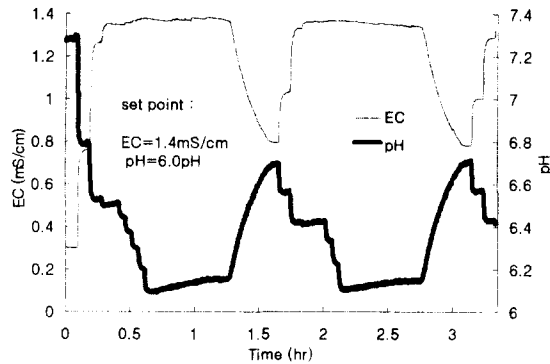


Fig. 10 Overall performance of EC and pH control for multiple steps of operation.

#### 다. 실증재배

개발된 액제 정밀계량 장치를 이용하여 실증재배를 수행하였으며 2개월 동안의 전기전도도 제어 결과를 표 1에 나타내었다. 전기전도도 제어시 최대 오차가 2.4%로 설정된 사역범위  $\pm 0.05$  mS/cm 안에서 제어어 실증재배 기간에 걸쳐 안정된 제어성능을 나타내었다.

Table 1. EC control performance of the developed nutrient-solution control system during cultivation period.

Date	10/21	10/28	11/4	11/11	11/18	11/25
EC (mS/cm)	1.385	1.401	1.366	1.391	1.421	1.391
Error (%)	1.4	0.07	2.4	0.6	1.5	0.6



표 2와 표 3에 조제된 양액의 Ca과 Mg에 대한 질량분석 결과를 나타내었다. 반복조제에 따른 Ca과 Mg의 최대 편차는 각각 0.5%, 1.8%로 나타났으며 액체 정밀계량 장치의 토출량편차인 0.33% 보다 크게 나타난 이유는 농축배양액을 조제할 때 나타나는 계량오차와 질량분석시 나타나는 회석배율의 오차 등에 기인한다고 판단된다.

실증재배 결과 100배 이상의 고농도의 농축배양액을 사용하는 양액 조제 관점에서 파이프 연결구, 수동 밸브 및 전자 밸브 등을 내화학성이 보장된 제품으로 선정할 필요성이 발견되었고, 정전 등 돌발적 사태에 대비하기 위하여 안전장치가 부착된 전용 컨트롤러의 개발이 필요하다고 판단되었다.

Table 2. Deviation in Ca in the nutrient-solution controlled.

Replication No.	1	2	3
Mass (mg/ℓ)	162.5	163.8	162.7
Deviation (%)	0.3	0.5	0.2

Table 3. Deviation in Mg in the nutrient-solution controlled.

Replication No.	1	2	3
Mass (mg/ℓ)	50.3	52.0	51.5
Deviation (%)	1.8	1.4	0.5

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 정밀 농축배양액 공급에 의한 양액 자동조제 시스템을 개발하기 위한 목적으로 수행되었으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 자체 개발한 액체 정밀계량 장치를 이용한 양액 자동조제 시스템을 개발하였다.
2. 개발된 양액 자동조제 시스템의 전기전도도와 산도에 대한 조제성능 실험을 수행하였다. 24℃에서 전기전도도는 ±0.05 mS/cm 범위에서 제어되었고 정정시간은 15분이었으며 산도제어는 ±0.2 pH 범위에서 제어되었고 정정시간은 15분이었다.
3. 상용의 양액 자동조제 시스템에 대한 전기전도도와 산도의 조제성능 실험을 수행하였다. 22℃에서 전기전도도는 설정치를 1.4 mS/cm로 하였을 때 500ℓ에 대한 누적평균은 1.29 mS/cm로 나타났으며 산도는 설정치를 6.0 pH로 하였을 때 500ℓ에 대한 누적평균은 6.1 pH로 나타났다.
4. 실증실험을 통하여 개발된 양액 자동조제 시스템은 ±0.05 mS/cm의 사역범위내에서 안정된 농도제어 성능을 나타냈다.
5. 실증실험을 통하여 조제된 양액의 Ca과 Mg에 대하여 질량분석을 수행한 결과 반복조제에 따른 Ca과 Mg의 최대 편차는 각각 0.5%, 1.8%로 나타났다.

#### 5. 참고 문헌

1. 이영희. 1988. 수경재배기술. 도서출판 대학서림.
2. 편집부. 1991. 센서의 원리와 사용법(III). 도서출판 세화.

3. 박권우, 김영식. 1991. 수경재배의 이론과 실제. 고려대학교 출판부.
4. 편집부. 1994. 시설원예핸드북. 한국원예기술정보센터.
5. 박상근 외. 1995. 수경재배 <기초이론부터 산업화까지>. 오성출판사.
6. 오길근. 1995. 양액 자동제어 장치 및 공급량 예측 프로그램의 개발. 서울대학교 석사학위논문.
7. Frank M. White. 1986. Fluid mechanics-2nd ed. McGraw-Hill Book Company.
8. Robert L. Mott. 1994. Applied fluid mechanics-4th ed. Macmillan Publishing Company.
9. Taikichi Takano. 1988. Effect of conductivity and temperature of nutrient solution on the mineral nutrition of horticultural crops in water culture. *Acta Horticulturae* 230. 299-305.
10. S. Sase, H. Ikeda and T. Takezono. 1988. Plant production in the artificial environment. *Acta Horticulturae* 230. 323-328.
11. T. Okano, T. Hoshi and H. Terazoe. 1988. Development of hydroponic system and adaptation of microcomputers for a commercial size vegetable factory. *Acta Horticulturae* 232. 343-348.
12. A. Araya, H. Oritz, E Van der Meer and A. Torres. 1991. Automation of a drip irrigation system. *IFAC Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*. 433-437.
13. H. H. van den Vlekkert, J. P. M. Kouwenhoven. 1992. Application of ISFETs in closed-loop system for horticulture. *Acta Horticulturae* 304. 309-320.