

## 이온전극을 이용한 순환식 양액 자동 조제에 관한 연구

# Study on Automatic Mixing of Nutrient Solution Using Ion Electrodes for Closed-Loop Hydroponics

김민규	류관희	장유섭	김기영
정회원	정회원	정회원	정회원
M. K. Kim	K. H. Ryu	Y. S. Jang	G. Y. Kim

### ABSTRACT

This study was carried out to develop an automatic mixing system of nutrient solution for closed-loop hydroponics using ion electrodes. The results of the study are summarized as follows:

1. It appeared that ion-electrodes had not to be soaked into nutrient solution for a long time since it was much less durable than EC or PH sensors. Once ion-electrodes were soaked into real nutrient solution for a long time, they became unstable.
2. Ion measurement modules, which were able to sample recirculated nutrient solution and easily wash and dry ion-electrodes, were developed in order to use ion-electrodes continuously.
3. The results of calibration tests on three kinds of ion electrodes presented that the time required to read measurement data was over 30 seconds. Using the calibration data the regression equations for the ion electrodes were developed.
4. An automatic nutrient-solution mixing system using the three kinds of ion electrodes was developed and then its accuracy was examined. The control errors of the mixing system using ion electrodes were in the range of 9.8 to 12%.

**Keywords** : Closed-loop, Hydroponics, Ion-electrode, Automatic control.

### 1. 서 론

우리나라의 양액재배는 재배역사가 매우 짧음에도 불구하고 농업 구조 개선을 위한 국가 예산 투자 확대로 재배 면적의 증가, 작물의 다양화, 양액 재배 시스템 자체의 국산화, 재배시설의 현대화

등에 의해 많은 발전을 이루어 왔다. 그러나 폐양액과 배지의 처리가 문제시되고 있어 그 해결책으로 친환경 순환식 재배 시스템의 필요성이 증대되고 있다. 우리나라의 양액재배 면적은 2001년 말 현재 736 ha로 아직까지 토양이나 지하수에 영향을 줄 정도의 면적은 아니지만 양액재배 면적이

---

The article was submitted for publication in January 2002. The authors are Kwan Hee Ryu, Professor, Min Kyu Kim, Dept of Agricultural Engineering, Seoul National University, Suwon, Korea. You Sub Jang and Giyoung Kim, National Agricultural Mechanization Research Institute. The Corresponding author is K. H. Ryu, Professor, Dept. of Agricultural Engineering, Seoul National University, Suwon, 441-744, Korea; E-mail : <ryukh@snu.ac.kr>.

급속히 증가하여 배출되는 폐양액의 양이 많아질 경우 허용기준을 넘을 우려가 있기 때문에, 밀지 않은 장래에 우리나라에서도 양액 재배시 양액의 외부 유출에 대한 규제가 시행될 것으로 예상된다.

현재까지 국내외적으로 개발되어 시판되고 있는 양액 자동조제 공급 시스템은 대부분이 비순환식 재배방식이고, 순환식 재배방식이라 할지라도 배양액의 전기전도도(Electricity Conductivity, EC)를 측정하여 기준 농도에 맞도록 농축 원액을 첨가하여 전체적인 무기이온들의 총합을 보정해 주는 방식에 불과했다. 하지만 생육이 왕성한 식물공장 시스템에서는 EC로만 제어될 경우 무기이온간의 불균형이 빠르게 나타나는 관계로 낭비되는 비료의 양이 매우 많다. 이러한 이유로 실시간 무기이온별 농도제어에 관한 연구가 최근에 활발하게 진행되고 있다(Adams, 1989; Hashimoto 등, 1989; 전, 1999).

국내에서는 모델식을 적용하여 실시간으로 배양액의 성분을 보정해주는 연구(서 등, 1999; 소, 2000; 김, 2001)가 수행된 바 있으나 이온전극을 이용한 양액성분 보정에 관한 연구는 보고되고 있지 않다.

본 연구에서 투입되는 비료량을 줄이고 배출되는 오염원을 극소화하기 위하여 상용의 이온전극을 이용하여 이온별 농도를 측정할 수 있는 양액상태의 온라인 계측모듈을 개발하고, 양액의 이온별 농도를 조절할 수 있는 조제 알고리즘을 개발하고자 하였다. 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

1) 작물에 적합한 양액상태의 조성을 위해 실시간 성분계측을 할 수 있도록 배액의 표본을 추출하고 사용된 이온전극을 세척 및 안정화시킬 수 있는 이온계측 모듈을 개발한다.

2) 재배환경 속에서 이온전극의 신뢰성 향상을 위하여 배양액의 이온농도 측정을 바탕으로 한 보정식을 개발한다. 또한, 이온전극에 의해 계측된 배액의 농도를 기초로 개별이온의 부족분을 보정

하여 재배장치에 공급이 가능하도록 양액 조제 및 공급 알고리즘을 개발한다.

3) EC에 의한 제어를 수행하는 기존의 양액 자동 조제 및 공급 장치를 이온별 제어가 가능한 구조로 재구성하여 개발된 알고리즘의 성능을 평가한다.

## 2. 재료 및 방법

이온농도의 계측은 실시간으로 온라인 계측이 가능한 이온 전극법을 이용하여 배양액의 상태를 계측하였다. 이온전극은 각 이온에 해당하는 이온교환기(ion exchanger)를 포함하는 겔 형태의 친유기체 막(membrane)과 접촉하는 액체의 내부 보충용액(liquid internal filling solution)을 포함한 전극의 몸체로 구성된다. 이 막이 계측하고자 하는 이온을 포함하는 용액과 접촉할 때 막 사이에서 전위가 발생한다. 이 전극의 전위는 이온 측정기를 이용하여 일정한 기준 전위에 대하여 측정된다.

표준용액과 측정용액 사이의 전위(potential)차를 측정함으로써 배액의 이온 농도를 알 수 있다.

### 가. 계측 항목 선정

작물에 반드시 공급되어야 할 다량 원소에는 C, H, N, O, P, K, Ca, S, Mg이 있고, 미량원소에는 Fe, Cl, Mn, B, Zn, Cu, Mo이 있다. 식물체에 흡수될 때 비금속 원소는 주로 음이온(anion)으로, 금속 원소는 양이온(cation)으로 흡수된다. 다량원소 중에서 공기나 물에서 흡수 가능한 C, H, O의 3가지를 제외하면 식물 생육을 위해 공급해 주어야 할 다량원소는 6가지가 되는데, 그 중 N, K, Ca의 3가지 원소를 계측 항목으로 선정하였다. 질소는 대상작물인 상추의 배양액 조성에 있어 절대적으로 많은 양을 차지하고, 공기 중에 많이 있으나 탄산가스와 달리 공기 중에서 직접 흡수되는 것이 아니라 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 또는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 형태로 뿌리를 통해 흡수된다. 특히 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 식물 영양학적인 측면에

서 매우 중요한 요소이며, 양액재배시 결핍현상이 일어나는 경우가 많아 질소의 농도를 계측 대상으로 정하였다. 칼륨은  $K^+$  이온의 형태로 흡수되며  $NO_3^-$  다음으로 많은 양이 필요하다. 칼슘은  $Ca^{2+}$  의 형태로 흡수되며 순환식으로 배양액을 재사용할 경우 생육 중반으로 갈수록 집적되는 대표적인 성분으로, EC에 의한 제어만으로는 이온성분의 불균형을 초래할 우려가 있어 측정 대상으로 선정하였다.

#### 나. 장치 구성

선정한 3가지 이온을 계측하기 위해 온라인용으로 개발된 전극(U-27077, Cole-Parmer, USA)과 신호변환기(U-56105-00, Cole-Parmer, USA)를 선정하였으며, 전극의 측도설정을 위한 표준액을 각각의 이온전극에 따라 1000 ppm 용액 450 ml를 조성하였다.

EC, pH 센서는 항상 배양액 속에 넣어두고 사용할 수 있어 연속적인 계측이 가능하지만 이온전극은 내구성이 EC나 pH 센서처럼 우수하지 못하기 때문에 연속적인 계측이 불가능하다. 따라서 전극이 배양액에 노출되는 시간을 최소화 할 수 있도록 필요시에 배양액 시료를 채취하여 계측한 후 전극의 세척 및 보관이 가능한 장치가 필요하다.

이와 같은 조건을 만족시키기 위하여 이온측정 모듈을 설계 및 제작하였다. 시료 채취 및 측정 구역을 3가지 이온전극에 따라 3개로 나누었고 내화확성이 강한 재질인 PVC를 사용하여 공간을 최소화하는 블록형태로 제작하였다.

측정모듈로 배양액의 시료를 공급시키기 위하여 강철 재질의 배관을 설치하였다. 시료의 균형적인 공급을 위해서 측정모듈로 연결된 각각의 공급호스에 수동 조작이 가능한 밸브를 설치하였고 배관의 중단에도 수동밸브를 설치하여 수압을 조절할 수 있도록 하였다. 또 시료 채취를 하지 않는 평상시에는 배액이 혼합탱크로 바로 들어가도록 유

로를 중간에 하나 더 만들어 주었다. 다음 그림 1은 측정모듈의 모형을 그림 2는 측정모듈을 포함한 양액재배장치의 개략도를 각각 나타내고 있다.

배액의 이온성분을 계측하기 위해 시료채취용 솔레노이드 밸브가 열리면 배관을 통해 흐르는 배액이 측정모듈로 공급되는 호스를 통해서 흐르고 나머지 배액은 다시 혼합탱크로 들어간다. 측정모듈에서 이온전극이 배액의 성분을 측정하고 나면 시료를 배출하도록 블록 밑에 설치된 솔레노이드 밸브가 열렸다 닫힌다.

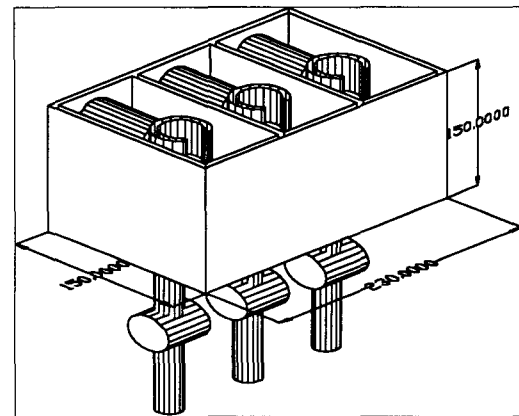


Fig. 1 A model of the measurement block.

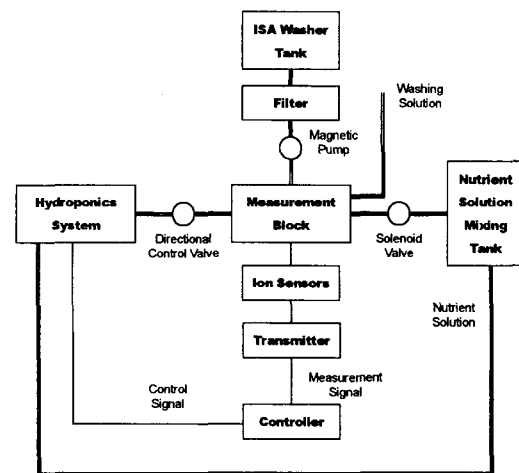


Fig. 2 Schematics of hydroponics system.

이와 동시에 증류수에 이온세기조절제(Ion Strength Adjuster, ISA)가 2% 농도로 첨가된 세척액이 마그네트 펌프에 의해서 각각의 전극의 몸체를 따라 흐르며 블록에 고정된 이온전극을 세척하고 배출되면서 전극을 안정화시킨다. 측정 후 측도 설정을 하지 않고 다시 측정하게 되면 배양액 속에 포함된 다른 이온성분으로 인해 전극의 정확도가 영향을 받게 되므로 계측은 1회만 수행하였고 이온전극을 최적의 상태로 계측이 가능하도록 계측 시작 10분전에 측도 설정을 해주었다.

#### 다. 배양액의 조제 및 공급 알고리즘

지금까지의 비순환식 양액제어는 각 비료염을 A액, B액의 두 가지로 나누어 양액 조성표의 각 비율대로 조제하는 방식으로 이온의 총량을 나타내는 EC를 이용한 제어를 했으나 양액 조성의 변화 요구시에 개별성분의 농도 증감이 어렵기 때문에 모든 성분의 농도를 비례적으로 증감시키게 된다. 그러나 EC에 의한 비례적인 농도 증감은 작물 재배시 모든 이온이 비례적으로 흡수되는 것이 아니고 이온에 따라 흡수의 정도가 다르기 때문에 배액 속에는 특정이온의 집적과 결핍현상이 발생한다. 식물이 생육을 하기 위해 요구하는 무기성분의 종류와 양은 온도, 습도, 광도 같은 환경요인에 따라서도 달라질 수 있기 때문이다.

양액재배의 선진국인 유럽 여러 나라들의 처방

전이 있고, 일본에서는 원시(園試) 배양액과 야마자키 배양액이 유명하다. 국내에서는 현재까지 200여종의 배양액의 종류가 있는데, 본 연구에서는 서울시립대 배양액을 바탕으로 양액을 조제하였다. 배양액 조성표의 각 성분 당량에서 원수에 포함되어 있는 성분량 만큼을 빼어 그 성분의 당량을 토대로 비료량(표 1)을 재산출하여 양액을 조제하였다.

조정된 당량표에서 SO<sub>4</sub>의 부족분이 발생하는대 이 것은 산 조절용으로 별도의 탱크에 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 사용하여 pH를 낮추기 때문에 SO<sub>4</sub>의 부족분을 보충할 수 있다.

배양액 탱크는 총 4개로 나누었다. A탱크: Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O와 Fe-EDTA, B탱크: MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O와 NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, C탱크: KNO<sub>3</sub>와 미량원소, D탱크: NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>로 구분하여 A, B 탱크는 300배액, C 탱크는 100배액으로 조제하여 넣었다. 마지막으로 D탱크에 산 조절액으로 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 사용하였다. 또 정확한 조제를 위하여 원수의 양을 조제 전에 300ℓ의 일정한 양으로 조절할 수 있도록 레벨스위치를 사용하여 원수의 상환을 조절하여 주었다. 본 연구에서는 3개의 이온전극을 사용하기 때문에 흡수경향이 비슷한 비료염은 하나의 탱크에, 또 흡수경향은 같으나 함께 섞여서는 안되는 성분은 탱크를 분리하여 조제해 주었다. 또 보정단위를 Ca와 K는 5ppm 단위로 하였고 흡수를 많이 해서 많은 공급이 이루어져야 하는 NO<sub>3</sub>는 10ppm 단위로

Table 1 Milliequivalent composition table of UOS nutrient-solution for lettuce when the nutrient composition of fresh water is taken into account

(unit : me/ℓ)

Fertilizer	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -H	P	K	Ca	Mg	SO <sub>4</sub>
	9.7	1	2.0	6.7	3.0	1.7	1.7
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>		0.67	2.0				
KNO <sub>3</sub>	6.7			6.7			
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O						1.7	1.7
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	3.0				3.0		

보정을 해주었으며 부족분을 보정해 줄 경우 Ca, K를 공급할 시 NO<sub>3</sub>도 같이 공급이 되므로 Ca, K가 공급될 때 들어가는 NO<sub>3</sub>의 양을 계산에 포함시켜 NO<sub>3</sub>의 보정이 동시에 이루어지도록 하였다. 위에서 서술한 내용을 기반으로 본 연구에서 개발한 배양액의 조제 및 공급 알고리즘은 그림 3과 같다. 이 알고리즘을 바탕으로 한 순환식 양액 자동조제공급 제어 소프트웨어는 제어기로 사용한 Single Board PC (PC86, TURSystem, Korea)가 지원하는 DataLight ROM-DOS 상에서 사용 가능한 Turbo C 2.0 프로그램 언어를 이용하여 작성하였다. 개발된 소프트웨어는 자동/수동 모드로 되어 있고 수동 모드에서는 사용자가 원하는 구동기를 원하는 시간 동안 구동할 수 있도록 되어 있다.

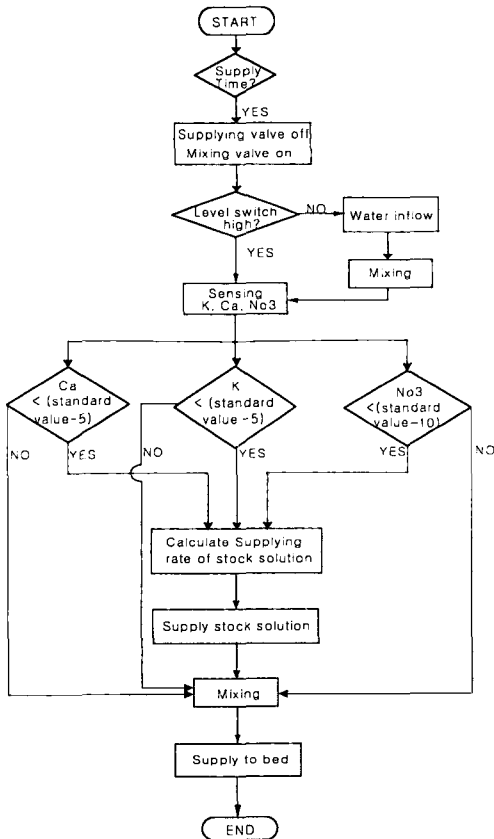


Fig. 3 Flowchart of the algorithm for mixing and supplying nutrient-solution.

자동 모드에서는 사용자가 조제시간을 입력하면 급액 시간에 사용자의 설정값에 맞도록 양액을 공급하도록 되어 있다.

### 3. 결과 및 고찰

이온전극의 재현정도와 안정화되는 시간을 측정하기 위하여 실제 사용조건처럼 한 번 계측이 끝나면 세척액으로 세척 후에 30분 동안 이온센서를 안정화시킨 후 다시 측도 설정을 하고 계측하는 작업을 5회 반복해서 수행하였다. 샘플용액의 농도를 70ppm, 53ppm, 35ppm 세 가지 수준으로 하여 100초 이상 이온센서의 신호를 측정하였다. 그림 4는 샘플용액속의 Ca<sup>2+</sup> 이온농도가 35ppm 일 때 5회 반복 측정시 Ca<sup>2+</sup> 전극의 반응 및 재현정도를 나타낸 것이다.

실험 결과 3가지 이온전극 모두 안정된 상태를 유지하는 시간은 배양액에 노출된 후 30초부터 53초까지였고, 이 시간 동안 편차 폭, 이온전극의 내구성과 진동 등을 고려하여 이온전극이 배양액에 노출된 후 45초 후에 측정하는 것이 적합하다고 판단되었다. 표 2는 Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>이온에 대해 배양액의 각 농도에 따라 45초에 이온전극으로 계측한 배양액의 평균농도 및 최대편차를 나타낸 것이다.

계측시 마다 측도설정을 정밀하게 하였으나 측

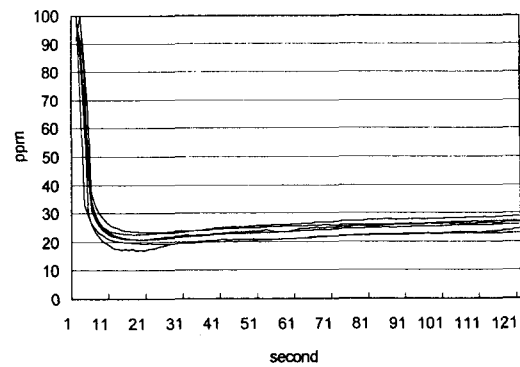


Fig. 4 Reproducibility of Ca<sup>2+</sup> of 35 ppm.

Table 2 Average and maximum deviation of Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in nutrient solution

(unit : ppm)

Nutrients Level	Ca <sup>2+</sup> Electrode		K <sup>+</sup> Electrode		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Electrode	
	Mean	Max. Error	Mean	Max. Error	Mean	Max. Error
1	62.87	1.79	338.20	-9.78	756.27	-22.01
3/4	46.20	2.02	255.80	13.03	619.23	-20.46
2/4	23.50	1.38	166.04	-9.78	421.31	14.84

정값에서 편차가 발생하고 측정시 출력값이 진동하였다. 이는 측정하고자 하는 이온성분에 방해작용을 하는 성분이 이온전극에 영향을 줌으로써 이 전극의 내구성을 약하게 만드는 것으로 사료된다. 배양액의 농도에 따른 이온전극의 출력 신호 특성을 분석하여 전극의 계측값을 이론적으로 계산한 실제농도에 맞게 보정하기 위해 보정식을 산출하였다. Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 이온전극을 각각 1배액, 5/6배액, 4/6배액, 3/6배액의 농도로 주요 계측 범위에 해당하는 4가지의 희석한 배양액을 조제하여 수행한 실험 결과 계산된 보정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Real Value(ppm) of Ca}^{2+} &= \\ &0.8912 \times \text{Measured value(ppm)} + 11.499 \\ \text{Real Value(ppm) of K}^{+} &= \\ &0.7314 \times \text{Measured value(ppm)} + 3.4267 \\ \text{Real Value(ppm) of NO}_3^{-} &= \\ &0.9851 \times \text{Measured value(ppm)} - 92.506 \end{aligned}$$

또 정확한 공급을 위한 정량펌프의 적합성을 판단하기 위하여 토출량 편차 실험을 수행한 결과 4개의 정량펌프 모두 최대 편차는 3% 이내였다. 그림 3의 알고리즘을 바탕으로 구성된 장치를 이용하여 실제 조제실험을 하여본 결과 Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 이온성분에 따른 최종제어 오차는 각각 그림 5, 6, 7과 같다.

양액 조제 장치를 구성하여 이온농도 제어 성능 실험을 수행한 결과 각 이온성분의 제어오차는

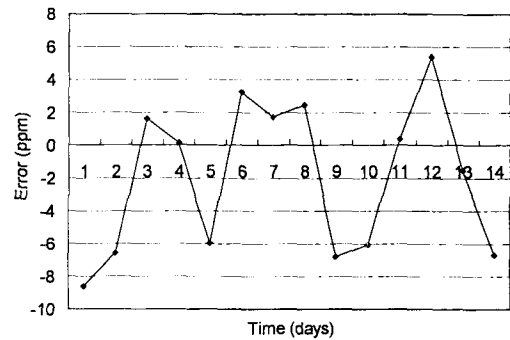


Fig. 5 Control error for Ca<sup>2+</sup> ion.

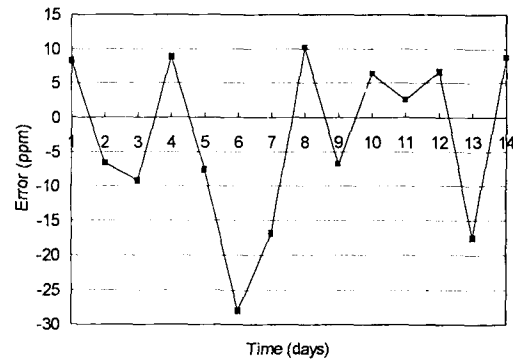


Fig. 6 Control error for K<sup>+</sup> ion.

Ca<sup>2+</sup>의 경우 처방전의 기준농도를 70ppm으로 설정시 최대 -8.61ppm, K<sup>+</sup>의 경우 처방전의 기준농도를 261ppm으로 설정시 최대 -28.03ppm, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 경우 처방전의 기준농도를 657ppm으로 설정시 최대 64.48ppm으로 나타났다. 제어오차가 나타나

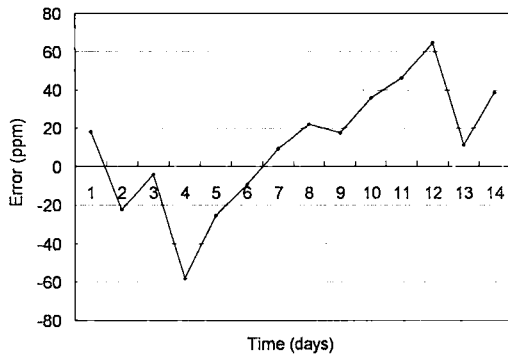


Fig. 7 Control error for NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ion.

는 원인으로서는 시간경과에 따른 이온센서의 성능 저하, 양액내 방해이온에 의한 측정정확도 감소, 농축배양액 조제시 농도조절 오차, 그리고 원수와 농축배양액의 불균일한 혼합 등에 기인한 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 이온전극을 이용한 순환식 양액재배에 적용할 수 있는 양액 자동조제 장치를 개발하기 위하여 수행되었으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 이온전극은 내구성이 약해서 EC나 pH 센서처럼 배양액에 항상 담가두고 연속적으로 사용하지 못하기 때문에 이온전극으로 배양액의 배액을 계측하기 위해서 계측 할 때만 배액의 시료를 따로 추출하여 이온전극에 배액을 공급해 주고 이온전극의 탈 부착이 용이하고 계측이 끝났을 경우 이온전극을 세척하고 건조시켜 보관할 수 있는 이온 계측모듈을 개발하였다.

2) 이온전극을 실제 배양액 내에 넣었을 경우 이온전극이 안정되는데 걸리는 시간은 3종류 모두 30초 정도로 나타났으며, 계측시 마다 실제값과 측정값의 보정식을 구하였다.

3) 양액조제 장치를 구성하여 이온농도 제어 성능실험을 수행한 결과 각 이온성분의 제어오차는 Ca<sup>2+</sup>의 경우 처방전의 기준농도를 70ppm으로 설정

시 최대 -8.61ppm, K<sup>+</sup>의 경우 처방전의 기준농도를 261ppm으로 설정시 최대 -28.03ppm, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 경우 처방전의 기준농도를 657ppm으로 설정시 최대 64.48ppm으로 나타났다.

실시간 온라인 계측에 의한 순환식 양액조제 알고리즘을 위해서 이온전극을 사용하였다. 이온전극의 내구성이 약하고 배양액 내에는 이온전극의 정확한 계측의 방해요인인 이온성분들이 포함되어 있기 때문에 매번 정확한 측도 설정을 수행해줌으로써 계측값의 신뢰도를 높일 수 있었고 이온전극을 이용한 온라인계측의 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 배양액 속에 장시간 넣어둔 상태로 사용하였을 경우 4시간 이상 경과하면 전극에서 나오는 신호가 지속적으로 상승하는 경향을 보였다. 장시간 동안 배양액에 노출되었던 전극은 측도 설정이 불가능한 수준으로 일농도의 용액 내에서 일정한 값을 나타내지 못하고 계측값이 지속적으로 상승하던가 하강하여 한계값까지 이르렀다. 이러한 이유로 연구용이 아닌 실제 장치에 적용하여 실용화하기 위해서는 내구성이 강하고 계측하고자 하는 이온에 대해 영향을 주는 방해이온 속에서도 정확도를 유지 할 수 있는 전극의 개발이 선행되어야 한다. 또한 정확한 배액 성분의 측정을 위해서는 측도 설정이 선행되어야 하는데 계측이 필요할 때마다 측도 설정을 자동으로 해줄 수 있는 자동측도 설정 모듈의 개발도 수행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. Adams, P. 1989. Some effects of root temperature on the growth and nutrient uptake of tomatoes in NFT. Proceeding of the 7th international congress of soilless culture, Flevehof. p.73-82.
2. Hashimito, Y., T. Morimoto, T. Fukuyama, H. Watake, S. Yamaguchi and H. Kikuchi. 1989. Identification and control of hydroponic system

- using ion sensors. Acta Hort. 245:490-497.
3. 전성필. 1999. 대구역 재배용 양액 자동조제 공급 시스템 개발. 서울대학교 석사학위 논문.
  4. 김형준. 2001. 순환식 고품배지 양액재배를 위한 토마토와 오이의 양분 흡수 모델링. 충북대학교 박사학위 논문.
  5. 소재우. 2000. 상추 식물 공장의 배양액내 무기이온 제어 및 배양액 보정 프로그램 개발. 서울시립대학교 석사학위 논문.
  6. 서명훈, 이상우, 이성재, 이용환, 박권우. 1999. 환경보전형 첨단 Recycling 양액재배 시스템 개발. 경기도농업기술원 시험연구보고서.
  7. 김형준. 2001. 순환식 고품배지 양액재배를 위한 토마토와 오이의 양분 흡수 모델링. 충북대학교 박사학위 논문.