

# 이온센서를 이용한 순환식 양액 자동 조제에 관한 연구

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

김민규\*  
정회원  
M.K.Kim

류관희\*  
정회원  
K.H.Ryu

장유섭\*\*  
정회원  
Y.S.Chang

### 1. 서론

본 연구의 목적은 상용의 이온센서를 이용하여 식물공장 형태의 재배방식에 가장 적합하고 투입되는 비료량을 줄이고 배출되는 오염원을 극소화 시켜 친환경적인 순환식 양액재배에 적용할 양액 이온농도의 온라인 계측 모듈을 개발하고 이온별 성분을 조제 할 수 있는 알고리즘개발을 목적으로 수행되었으며, 그 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 작물에 적합한 양액상태의 조성을 위해 이온센서를 이용하여 온라인으로 퇴액의 표본을 추출하고 성분계측을 위해 사용된 이온센서를 세척 및 안정화시킬 수 있는 이온계측 모듈을 개발한다.
2. 배양액 속에서 이온센서의 경향성을 파악하여 보정식을 개발하고 이온센서에 의해 계측된 퇴액의 성분을 기초로 하여 부족분을 보정한 후 재배 장치에 공급 가능한 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

#### 가. 계측 항목 선정

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, O 의

---

\* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

\* 농촌진흥청 농업기계화연구소 생물생산기계과

3가지를 제외하면 식물 생육을 위해 공급해 주어야 할 다량원소는 6가지가 된다. 이 중에서 N, K, Ca 3가지를 선정하였는데, 질소는 대상작물인 상추의 배양액 조성에 있어 절대적으로 많은 양을 차지하는데 공기중에 많이 있으나, 탄산가스와 달리 공기 중에서 직접 흡수되는 것이 아니라  $\text{NO}_3^-$  또는  $\text{NH}_4^+$ 의 형태로 뿌리를 통해 흡수된다. 칼륨은  $\text{K}^+$ 이온의 형태로 흡수되며  $\text{NO}_3^-$  다음으로 많은 양을 차지한다. 칼슘은  $\text{Ca}^{2+}$ 의 형태로 흡수되며 순환식으로 배양액을 재 사용할 경우 생육중반으로 갈수록 집적되는 대표적인 성분으로 EC로만 제어할 경우 이온성분의 불균형을 초래한다.

#### 나. 구성

선정한 3가지 이온을 계측하기 위해 온라인용으로 개발된 센서를 선정하였는데 센서와 세트 구성된 트랜스미터 와 센서를 측도설정 하기 위한 표준액을 각각의 이온센서에 따라 3가지의 1000 ppm 용액 450ml를 요구성능에 만족하도록 선정하였고 센서와 트랜스미터를 그림 1에 나타내었다.

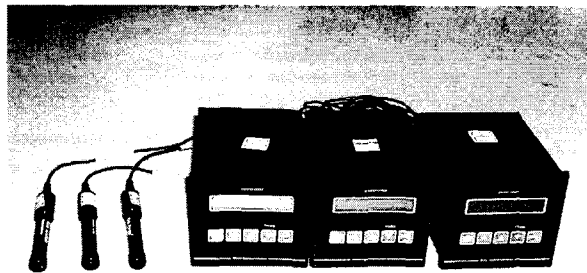


Fig 1. Ion-selective electrodes and transmitters

EC, pH 센서는 항상 배양액 속에 넣어두고 사용할 수 있어 연속적인 계측이 가능하지만 이온센서는 내구성이 EC 나 pH 센서처럼 우수하지 못하기 때문에 연속적인 계측이 불가능하다. 따라서 필요시에 배양액의 표본을 채취하여 계측한 후 센서의 세척 및 보관이 가능하게 하여 배양액에 노출되는 시간을 최소화 할 수 있는 장치의 구성이 필요하다.

이와 같은 이유로 본 연구에서는 3가지 이온센서를 사용하기 때문에 구역을 3개로 나누었고 PVC를 사용하여 블록형태로 제작하였다. 샘플링 블록으로 배양액의 샘플을 공급시키기 위한 목적으로 강철 재질의 배관을 샘플의 추출이 용이하도록 설계하였다. 샘플의 균형적인 공급을 위해서 샘플링 블록으로 연결된 각각의 공급호스에 수동 조작이 가능한 밸브를 설치하였고 배관의 중단에도 수동밸브를 설치하여 수압을 조절하여 주었다. 또 샘플을

채취하는 작업을 하지 않는 평상시에는 퇴액이 혼합탱크로 바로 들어가도록 유로를 중간에 하나 더 만들어 주었다. 다음 그림 2, 3, 4는 샘플링 블록의 모형도와 외형도 그리고 배관의 외형도 이다.

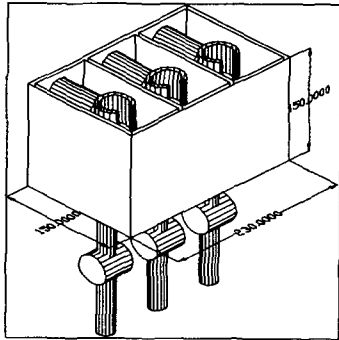


Fig. 2 A model of the measurement block



Fig 3 External view of the measurement block

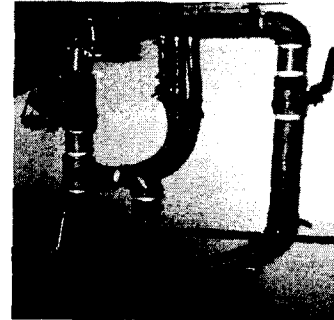


Fig 4 Pipe Line for sampling

구성된 장치의 작동원리는 퇴액의 이온성분을 계측하기 위해 샘플채취용 솔레노이드 밸브가 열리면 배관을 통해 흐르는 퇴액이 샘플링 블록으로 공급되는 호스를 통해서 흐르고 나머지 퇴액은 다시 혼합탱크로 들어간다. 샘플링 블록으로 퇴액이 공급되는 호스의 중간에 수동밸브를 설치하여 샘플의 양을 조절할 수 있으며 샘플링 블록에서 이온센서가 퇴액의 성분을 측정하고 나면 샘플을 배출하도록 블록 밑에 설치된 솔레노이드 밸브가 열렸다 닫히면 ISA가 첨가된 세척액이 마그네트 펌프에 의해서 각각의 센서의 몸체를 따라 흐르며 블록에 고정된 이온센서를 세척하며 세척액이 배출될 때까지 센서를 안정화시킨다. 측정 후 측도 설정을 하지 않고 다시 측정하게 되면 배양액 속에 포함된 다른 이온성분으로 인해 센서의 정확도를 신뢰할 수 없었던 문제가 있었다. 그래서 계측은 1회만 수행하였고 이온센서를 최적의 상태로 계측이 가능하도록 계측 시작 10분전에 측도 설정을 해주었다.

#### 다. 배양액의 조제 및 공급 알고리즘

배양액 조성은 서울시립대 처방전에 나와 있는 조성표의 각 성분 당량에서 원수에 포함되어 있는 성분량 만큼 빼서 그 성분의 당량을 토대로 비료량을 계산출하였다. 표 1에 서울시립대 일상추 배양액에서 원수 성분을 고려한 각 성분의 당량표이다.

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 |     |                 |

재조성한 당량표에서 SO<sub>4</sub>의 부족분이 발생하는데 여기에 산조절용으로 소탱크에 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 사용하여 pH를 낮추기 때문에 SO<sub>4</sub>의 부족분을 보충할 수 있다.

배양액 탱크를 5개로 나누어 조제하였다. 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>를 구분하여 A, B, C 탱크는 300배액으로 조제하였고 C 탱크는 100배액으로 조제하여 넣었다. 마지막으로 D 탱크에 산조절액으로 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 사용하였다. 또 정확한 조제를 위하여 원수의 양을 조제 전에 일정한 양으로 조절할 수 있도록 레벨스위치를 사용하여 항상 조제 전에는 300ℓ가 되도록 혼합탱크의 부피를 계산하여 레벨스위치의 상한을 조절하여 주었다. 만약 이온센서의 수를 다량원소의 각 이온성분별로 모두 사용한다면 하나의 비료염당 하나의 소탱크를 적용하여 모두 8개를 사용해서 각 성분별 조절을 할 수 있으나 본 연구에서는 3개의 이온센서를 사용하기 때문에 흡수경향이 비슷한 비료염은 하나의 탱크에, 또 보정단위를 Ca와 K는 5ppm 단위로 하였고 흡수를 많이 해서 많은 공급이 이루어져야 하는 NO<sub>3</sub>는 10ppm 단위로 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 포함 시켜 NO<sub>3</sub>의 보정이 동시에 이루어지도록 하였다. 위에서 서술한 내용을 기반으로 본 연구에서 개발한 배양액의 조제 및 공급 알고리즘을 개발하였다.

### 3. 결과 및 고찰

이온센서의 재현정도와 안정화되는 시간을 측정하기 위하여 3가지 농도의 배양액을 실험실에서 제조하여 실험해 본결과 3가지 센서 모두 안정된 상태를 유지하는 시간은 배양액에 노출된 후 30초부터 53초까지였고, 이 시간 동안 편차 폭, 이온센서의 내구성과 진동 등을 고려하여 이온센서가 배양액에 노출된 후 45초의 값이 적합하다고 판단되었다. 표 2는 Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 이온에 대해 배양액의 각 농도에 따라 45초에 이온센서로 계측한 배양액의 평균농도 및 최대편차를 나타낸 것이다.

Table 2 Average and maximum deviation of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  in nutrient solution (unit : ppm)

|        | $\text{Ca}^{2+}$ Electrode |      | $\text{K}^+$ Electrode |       | $\text{NO}_3^-$ Electrode |        |
|--------|----------------------------|------|------------------------|-------|---------------------------|--------|
|        | 평균                         | 최대편차 | 평균                     | 최대편차  | 평균                        | 최대편차   |
| 1 배액   | 62.87                      | 1.79 | 338.20                 | -9.78 | 756.27                    | -22.01 |
| 3/4 배액 | 46.2                       | 2.02 | 255.80                 | 13.03 | 619.23                    | -20.46 |
| 2/4 배액 | 23.5                       | 1.38 | 166.04                 | -9.78 | 421.31                    | 14.84  |

계측시 마다 측도설정을 정밀하게 하였으나 측정값에서 편차가 발생하고 측정시 출력값이 진동을 하다가 상승하거나 감소하는 것은 측정하고자 하는 이온성분에 방해작용을 하는 성분이 이온센서에 영향을 줌으로써 이온센서의 내구성을 약하게 만드는 것으로 사료된다. 각 농도에서의 배양액의 경향성을 분석하여 센서의 계측값을 실제농도에 맞게 보정하기 위해 보정식을 산출해야 한다. 실험은  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  이온센서를 각각 1 배액, 5/6 배액, 4/6 배액, 3/6 배액의 농도로 주요 계측범위에 해당하는 4가지의 희석한 배양액을 조제하여 수행한 결과 보정식은 다음과 같다.

$$\text{Real Value(ppm)} = 0.8912 \times \text{Measured value(ppm)} + 11.499 \dots (\text{Ca}^{2+})$$

$$\text{Real Value(ppm)} = 0.7314 \times \text{Measured value(ppm)} + 3.4267 \dots (\text{K}^+)$$

$$\text{Real Value(ppm)} = 0.9851 \times \text{Measured value(ppm)} - 92.506 \dots (\text{NO}_3^-)$$

또 정확한 공급을 위하여 정량펌프의 적합성을 판단하기 위하여 토출량 편차 실험을 수행한 결과 4개의 정량펌프 모두 최대 편차는 3% 이내 이었다. 이러한 알고리즘을 바탕으로 구성된 장치를 이용하여 실제 조제실험을 하여본 결과 각 이온성분에 따른 최종제어 오차는 다음 그림 3, 4, 5 와 같다.

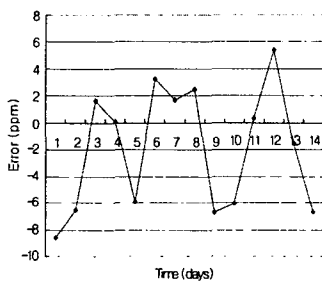


Fig 6 Control error for  $\text{Ca}^{2+}$  ion

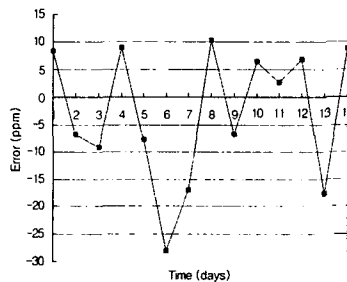


Fig 7 Control error for  $\text{K}^+$  ion

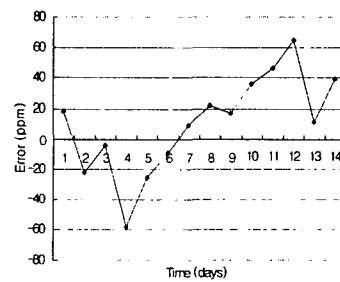


Fig 8 Control error for  $\text{NO}_3^-$  ion

양액조제 장치를 구성하여 이온농도 제어 성능실험을 수행한 결과 각 이온성분의 제어오차는  $\text{Ca}^{2+}$ 의 경우 처방전의 기준농도를 70 ppm으로 설정시 최대 -8.61 ppm,  $\text{K}^+$ 의 경우 처

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

#### 4. 요약 및 결론

실시간 온라인 계측에 의한 순환식 양액조제 알고리즘을 위해서 이온센서를 사용하였다. 이온센서의 내구성이 약하고 배양액 내에는 이온센서의 정확한 계측의 방해요인인 이온성분들이 포함되어 있기 때문에 매년 정확한 측도 설정을 수행해줌으로써 계측값의 신뢰도를 높일 수 있었고 이온센서를 이용한 온라인계측의 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 배양액 속에 장시간 넣어둔 상태로 사용하였을 경우 4시간 이상 경과하면 센서에서 나오는 신호가 지속적으로 상승하는 경향을 보였다. 장시간 동안 배양액에 노출되었던 센서는 측도 설정이 불가능한 수준으로 일정농도의 용액 내에서 일정한 값을 나타내지 못하고 계측값이 지속적으로 상승하던가 하강하여 한계값 까지 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 센서의 개발이 선행되어야 한다. 또한 정확한 퇴액 성분의 측정을 위해서는 측도 설정이 선행되어야 하는데 계측이 필요할 때마다 측도 설정을 자동으로 해줄 수 있는 자동 측도 설정 모듈의 개발도 수행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 5. 참고 문헌

1. 박권우, 김영식. 1998. 양액재배. 아카데미서적
2. 서명훈, 이상우, 이성재, 이용환, 박권우. 1999. 환경보전형 첨단 Recycling 양액재배 시스템 개발. 경기도농업기술원 시험연구보고서
3. 전성필. 1999. 다구역 재배용 양액 자동조제공급 시스템 개발. 서울대학교 석사학위 논문
4. 소재우. 2000. 상추 식물 공장의 배양액내 무기이온 제어 및 배양액 보정 프로그램 개발. 서울시립대학교 석사학위 논문.
5. 김형준. 2001. 순환식 고품배지 양액재배를 위한 토마토와 오이의 양분 흡수 모델링. 충북대학교 박사학위 논문.
6. 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, Flevohof. p.73-82.
7. Hashimoto, 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.