



## 1. 서 론

양액재배는 재배관리, 재배환경, 식물생육의 관점에서 토양재배에 비해 우수하나(이영희, 1988) 두 종류의 농축배양액을 사용하는 경우 조제 과정에서 양액을 혼합하는 장치간의 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(박 외, 1991).

우리 나라의 경우 수경재배 작물 중 대표적인 것이 잎상추와 토마토인데, 토마토는 영양생장과 생식생장을 균형있게 관리하지 않으면 고품질 다수확을 기대하기 어려운 특성을 지니고 있어서 배양액의 조성과 농도관리가 중요하다.

현재 채택되어 사용되는 농축배양액 주입펌프장치로서는 벤튜리관식 펌프, 수압작동식 펌프, 전기작동식 펌프 등이 있다. 그러나 벤튜리관식 펌프는 사용자가 설정한 공급유량을 정밀하게 공급하기 힘들며, 수압작동식 펌프는 정확한 개폐 단속이 까다로워 양액의 정밀한 공급을 요하는 양액조제용 펌프로서 사용하기가 쉽지 않다. 전기작동식 펌프는 정밀한 양액의 주입이 가능하나 사용시간에 따라 펌프내의 다이어프램의 오차가 제품간 토출량 편차를 증가시키는 단점이 있으며 부품의 단가가 높으므로 양액조제 시스템의 가격을 낮추어 양액재배의 보급확산을 도모하기 위해서는 정밀한 양액제어가 가능한 저가의 농축배양액 공급장치 개발이 시급한 실정이다.

양액조제 시스템은 조제 방식에 따라 직접 관로 투입 시스템, 혼합 후 공급 시스템, 연속 혼합 시스템으로 나뉜다(편집부, 1994; 박상근 외, 1995).

직접 관로 투입 시스템은 별도의 양액 혼합 탱크가 없고, 농축된 양액을 주관로에 직접 투입하는 시스템으로 가격이 다소 저렴한 편이나, 짧은 관로를 통과하여 혼합된 양액이 베드에 유입될 경우 양액의 농도와 산도의 편차가 커질 수 있다.

혼합 후 공급 시스템은 농축배양액과 지하수를 이용하여 대형의 양액 혼합탱크에서 조제한 후에 배지에 공급하는 시스템으로, 재배 면적에 비례하여 혼합탱크의 용량이 커져야 하며 조제시간이 길어지는 단점이 있다.

연속 혼합 시스템은 재배면적에 관계없이 양액의 농도와 공급횟수를 다양하게 제어할 수 있는 시스템이며, 대규모 고품배지경 재배에 적용되고 있다.

양액조제 시스템 개발에 대한 관심이 증대하여 다양한 연구 결과가 보고되고 있으나, 본 연구와 연관된 국내외의 사례를 살펴보면 다음과 같다. 오길근(1995)은 HANNA사에서 생산하는 상용 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 제어하였으며, 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.

따라서 본 연구에서는 저가의 신뢰성 있는 액제 정밀계량장치 개발과 이를 이용하여 혼합 후 공급방식의 양액 자동조제 시스템을 개발하기 위한 것으로서 그 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 저가의 액제 정밀계량장치를 설계·제작하고 성능 실험을 수행한다.
2. 농축배양액 공급장치로 사용되는 상용 정량펌프의 성능을 평가하고 개발된 계량 장치의 실험 결과와 비교하여 신뢰성을 검증한다.
3. 자체 개발된 액제 정밀계량장치의 제어 알고리즘을 개발하여 양액 자동조제 시스템을 완성하며, 개발된 시스템의 조제 성능을 평가한다.
4. 상용화된 양액조제 시스템의 제어 성능을 실험을 통하여 검증하고 개발된 양액조제 시스템의 실험 결과와 비교·분석한다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 액제 정밀계량장치 개발

(1) 농축배양액 공급방식

농축배양액 및 산·알칼리 용액을 정밀하게 혼합하여 양액을 조제하기 위해서 정밀한 공급장치가 필요하며 전 생육기간에 걸쳐 일정한 토출량을 확보할 수 있는 내구성과 경제성이 고려되어야 한다. 그림 1은 액체정밀 계량장치의 개념도이다.

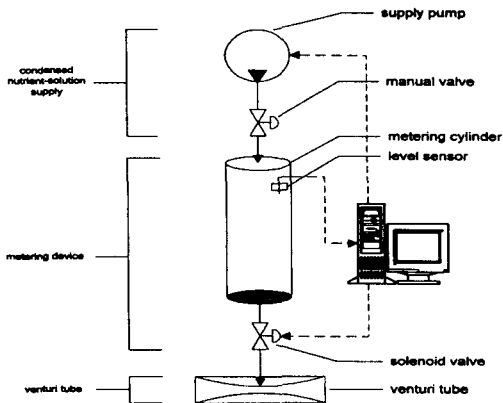


Fig. 1 Schematic diagram of the metering device system.

(2) 액체 정밀계량 장치

본 연구에서 개발된 액체 정밀계량장치에 적용되는 부품은 상용의 정량펌프를 대체하기 위하여 정밀성, 경제성을 기준으로 선정하였으며, 4.2pH의 산성 양액에 부품이 변형되어 배출량의 편차를 야기하지 않고 장기간 사용할 수 있도록 내구성 및 내화학성을 고려하였다. 이 장치는 농축배양액 공급부, 농축배양액 계량 및 배출부, 양액 역류 방지용 벤츄리부 등으로 구성하였다.

농축배양액 공급부는 농축배양액 탱크에 저장된 농축배양액을 농축배양액 계량 및 배출부로 공급하는 공급펌프와 그 공급량을 조절할 수 있는 수동밸브로 구성된다. 농축배양액 공급펌프는 농축배양액 계량 및 배출부로 소량의 배양액을 공급할 수 있어야 하며, 재질은 케이싱 및 임펠러가 폴리프로필렌으로 KCl, KNO<sub>3</sub> 등으로 구성되어 있는 양액에 내구성 및 내화학성을 가진다(LG, 1997). 표 1에 선정된

펌프의 명세와 그림 2에 공급펌프의 외형을 나타내었다.

Table 1 Specifications of the pump

Specifications	Supply pump
Manufacturer	KUMIL
Type	Centrifugal pump
Max head	3.5m
Material	Polypropylene
Max flow rate	19 l/min
Power	110/220 V; 50/60 Hz

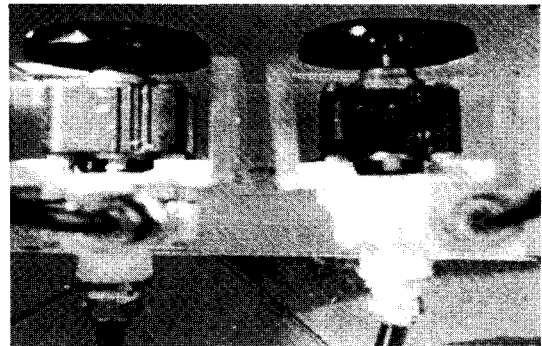


Fig. 2 View of the supply pumps.

농축배양액 계량 및 배출부는 액체를 계량하기 위한 계량용기, 액체의 높이를 일정하게 유지시키는 수위센서, 그리고 전자밸브로 구성된다. 농축배양액 계량 및 배출부를 구성하는 계량용기의 규격은 다음의 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 결정하였다.

$$Q = \frac{A \times V}{1000} = \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \times \frac{V}{1000} \dots\dots\dots (1)$$

$$V = \sqrt{2gH} \dots\dots\dots (2)$$

Q: 유량(cm<sup>3</sup>/s), A: 단면적

D: 배출구직경, V: 유속, H: 수두

윗식을 이용하여 계량용기의 높이는 20 cm, 직경

은 10%의 마찰손실을 고려하여 9.53 mm (3/8 in)로 결정하였다.

그림 3에 부자형(float type) 수위센서의 작동방법을 나타내었다. 그림의 ①에서 농축배양액을 하부 수위센서 위치까지 공급하고, ②는 일정 높이의 수위를 확보한 후 조제하기 전 대기 상태이며, ③에서 수위를 유지하며 농축배양액을 공급 및 배출하며, ④는 상부 수위센서로 농축배양액의 넘침을 방지하는 것을 나타낸다.

그림 4에 농축배양액 계량 및 배출부의 형태를 나타내었다.

벤츄리부는 농축배양액의 흡입을 원활히 하고 양액이 계량용기내로 역류하는 현상을 방지하기 위하여 설계 및 제작되었다.

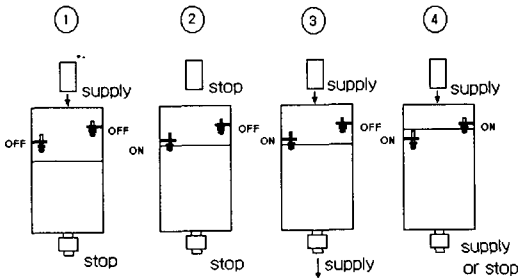


Fig. 3 Theory of operating metering cylinder.

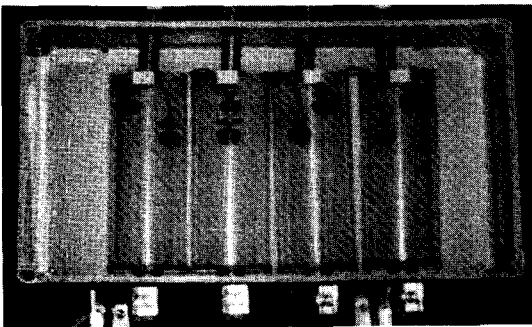


Fig. 4 View of the metering cylinder developed.

그림 5는 벤츄리부를 설명하는 그림으로 지점 1과 2에 대한 베르누이 정리를 이용한 비압축성 유체의 에너지 방정식을 이용하여 배출유량을 구하였다.

그림 6에 벤츄리관 직경과 배출유량과의 관계를 나타내었고, 그림 7에 개발된 양액 역류 방지용 벤츄리관을 나타내었다.

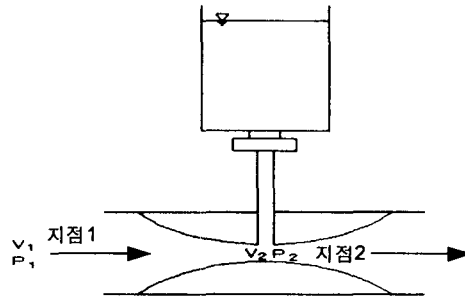


Fig. 5 Venturi tube.

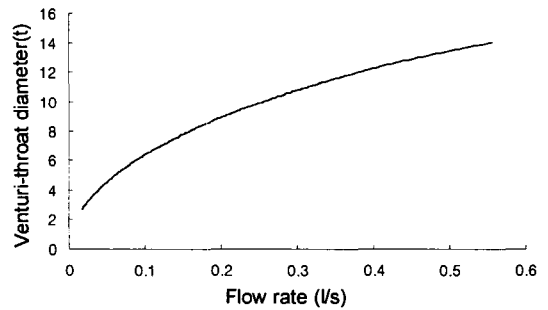


Fig. 6 Relationship between venturi-throat diameter and flow rate.

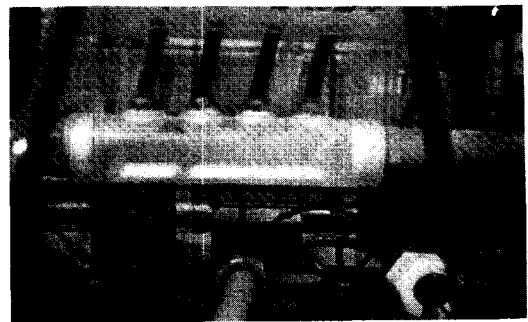


Fig. 7 View of the venturi tube developed.

### 나. 양액 자동조제 시스템의 구성

본 연구에서 개발한 양액 자동조제 시스템은 자체 개발한 액체 정밀계량 장치, 검출장치 및 신호처리 회로, 데이터 수집장치 및 퍼스널 컴퓨터 등으로 구성되었는데, 시스템의 설계시 고려사항은 다음과 같다.

1. 정밀한 양액 조제가 가능할 것
2. 시스템 구성 부품의 가격이 저렴할 것
3. 계측장치의 착탈을 용이하게 하여 보수가 유리할 것

#### (1) 계측 시스템

양액 재배에서 양액의 상태는 온도, 전기전도도, 산도 등 세 가지 물리·화학적 성질로 나타내는데, 상기 항목을 측정하기 위하여 센서 및 신호변환기를 부착하였다.

양액의 온도는 측온저항체 방식의 소자를 사용하여 측정하였으며, 신호처리 장치는 코닉스사의 KH-2110 트랜스미터를 선정하였다.

양액의 농도는 전기전도도 방식의 소자를 이용하여 측정하였으며, HANNA사의 HI943500 신호변환기를 사용하였다.

양액의 산도는 유리전극 방식의 소자로 측정하였으며 신호변환기는 센서 전극간의 기전력 신호 처리 및 자동 온도보상 기능 등을 갖춘 HANNA사의 HI8710을 사용하였다.

#### (2) 제어 시스템

상기 계측 시스템으로부터의 양액 상태에 대한 현재 값과 농도 및 산도 등의 설정값에 의하여 양액을 자동 조절할 수 있는 제어 시스템은 퍼스널 컴퓨터와 on-board 방식의 DA&C (data acquisition & control unit)로 구성된다.

그림 8에 퍼스널 컴퓨터를 이용한 양액 자동조제 시스템의 구성도를 나타내었으며 그림 9에 전체 회로도를 나타내었다.

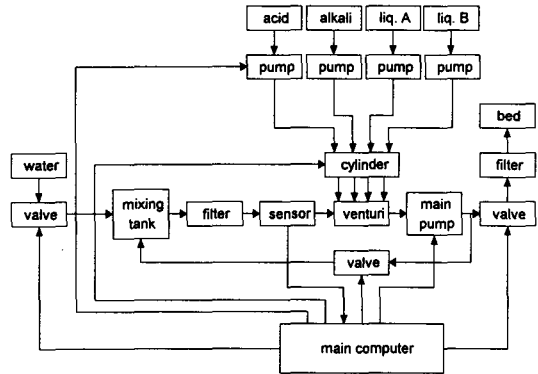


Fig. 8 Schematic diagram of the nutrient-solution mixing system.

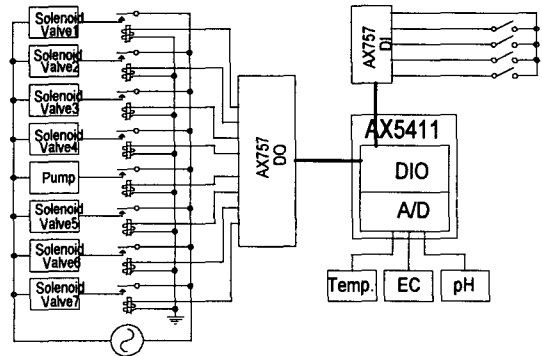


Fig. 9 Circuit diagram of the nutrient-solution mixing system.

또한 양액 자동조제 시스템의 운용을 위하여 제어 및 계측 알고리즘이 포함된 전용 소프트웨어가 개발되었으며, 그림 10에 개발된 소프트웨어의 자동제어부 흐름도를 나타내었다.

전기전도도는 0.1~9.9 mS/cm, 사역범위는  $\pm 0.05$  mS/cm이며, 제어방식은 초기에 설정치의 50%에 도달하도록 농축배양액을 공급한 후 도달 정도를 판단하여 다음 목표치를 결정하는 피드백(feedback) 방식을 적용하였다. 상술한 제어 알고리즘을 그림 11에 순서도로 나타내었다.

산도의 경우는 농도의 제어방식과 동일하나 액체의 투입량에 따른 산도값의 변화를 2차함수로 회귀

하여 적용하였으며, 산도 설정범위는 0.1~9.9 pH, 사역범위는  $\pm 0.2$  pH로 하였다.

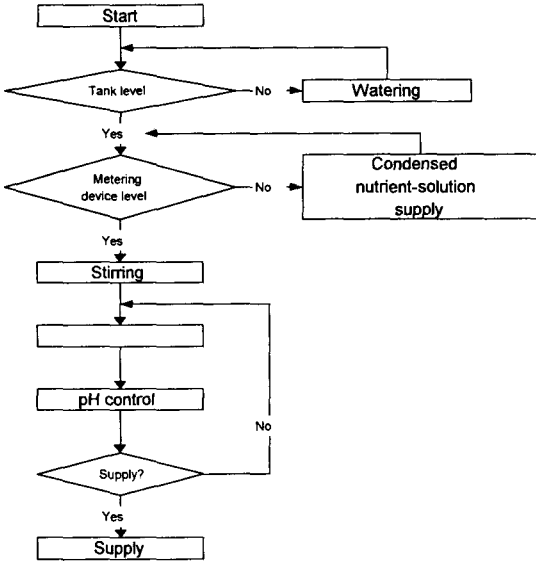


Fig. 10 Flowchart of the program for operating the automatic control system.

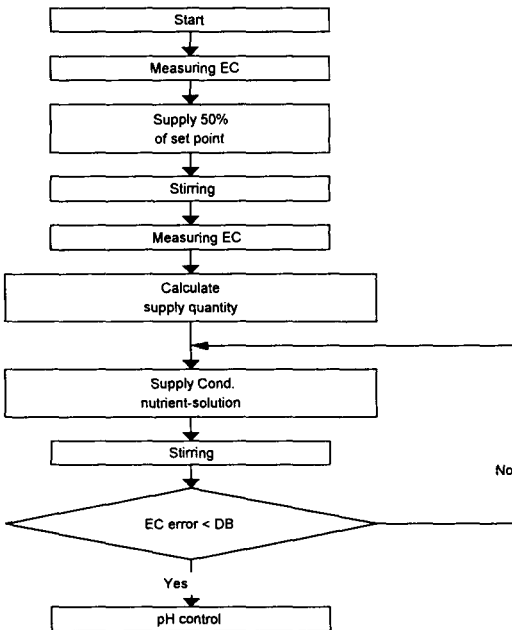


Fig. 11 Flowchart of the EC control.

다. 양액 자동조제 장치의 제작

전체 시스템의 외형을 그림 12에 나타내었다.

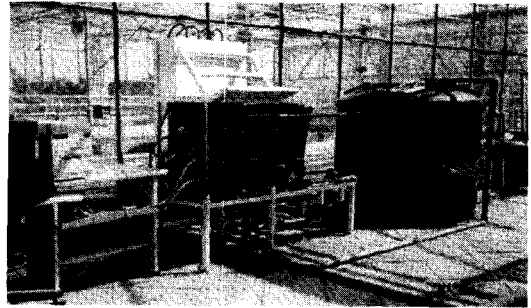


Fig. 12 Overview of the automatic nutrient-solution mixing system.

라. 성능실험

액제 정밀계량장치의 성능에 대한 검증은 구동시간에 따른 농축배양액 공급장치의 배출량, 제품간 배출량 편차를 측정하여 그 결과를 분석하는 실험으로 수행하였다.

4개의 액제 정밀계량장치의 제품간 배출량 편차는 10회에 걸쳐 각각 30초간 구동한 배출량으로 비교하였으며, 4개월 동안 600시간을 구동한 후 배출량을 조사하였다. 또한 상용 정량펌프와의 비교실험을 위하여 한나(HANNA, Italy)사와 블루화이트(Blue White, USA)사의 정량펌프(Table 2 참고)를 각각 2개씩 선정하여 5회에 걸쳐 각각 30초간 구동한 후 배출량의 제품간 편차를 조사하였다. 실험의 정확성을 기하기 위하여 정량펌프의 초기 설정상태를 그대로 유지하면서 측정하였다.

Table 2 Specification of HANNA and Blue White metering pump

	Power	Pmax	Flowrate
HANNA	220V, 50A	3 bar	15 l/h
Blue White		30 p.s.i	7.9 g/h

개발된 양액 자동조제 시스템의 성능평가 항목은 전기전도도 및 산도이며 1회 또는 연속 조제시의 제어 성능을 평가하도록 하였다. 전기전도도의 제어는 200배액의 농축배양액을 사용하였으며, 산도의 제어는 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 산성용액과 KOH의 알카리용액을 사용하였다.

또한 네타핌(NETAFIM, Israel)사의 상용화된 양액 조제 시스템에 대한 실제 성능을 검증하고 개발된 시스템과 비교를 위하여 조제 성능실험을 수행하여 그 결과를 나타내었다. 실험은 연속적으로 공급되는 양액이 배지에서 누적되는 형태로 작물이 흡수한다고 가정하여 50 l 씩 10회에 걸쳐 조제한 결과를 각 표본의 전기전도도 및 산도값과 그 값의 누적 평균값을 확인하는 방법으로 실험을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 액체 정밀계량장치

개발된 액체 정밀계량장치의 구동 시간과 배출량의 관계를 그림 13에 나타내었으며 회귀방정식을 식 (3)에 나타내었다. 구동시간과 배출량과의 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.9999로 나타났으며 구동시간을 이용하여 액체 정밀계량장치의 배출량 제어가 가능함을 확인하였다.

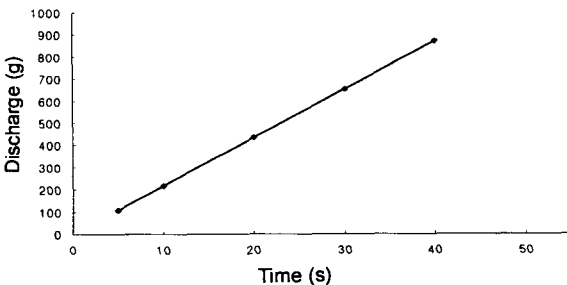


Fig. 13 Relationship between time and discharge

$$Discharge = 21.759 \times Time \dots\dots\dots (3)$$

Discharge unit : g

Time unit : s

개발된 4개의 액체 정밀계량장치의 제품간 배출량 편차 그래프를 그림 14에 나타내었다. 또한 한나(HANNA, Italy)사와 블루화이트(Blue White, USA)사의 정량펌프에 대한 제품간 배출량 편차 그래프를 그림 15 및 그림 16에 각각 나타내었다.

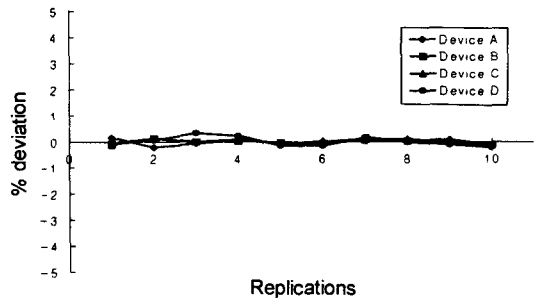


Fig. 14 Deviation in flow rate between the metering devices developed.

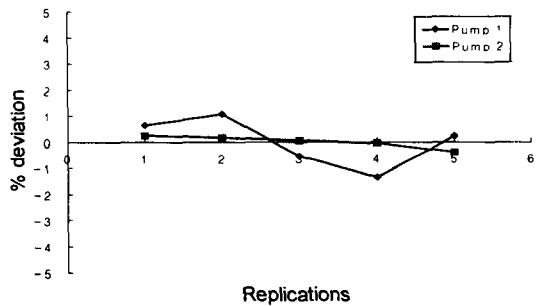


Fig. 15 Deviation in flow rate for the commercial metering pumps made by HANNA Inst.

개발된 액체 정밀계량장치를 4개월 동안 600시간을 구동한 후 제품간 배출량 편차를 10회에 걸쳐 각각 30초간 구동하여 성능실험을 수행한 결과 그림 14에서와 같이 제품간 편차가 0.33%로 나타났다. 반면에 상용 정량펌프의 경우 그림 15의 HANNA사의

제품은 1.38%, 그림 16의 Blue White사의 제품은 2.45%로 각각 나타났다.

상기 결과를 종합하면 개발된 액체 정밀계량장치를 이용하는 경우에 정밀한 조제가 가능하며, 장시간 사용 후에도 성능의 변화가 크지 않으므로 주기적인 배출량 점검 및 교정이 필요 없다고 판단된다.

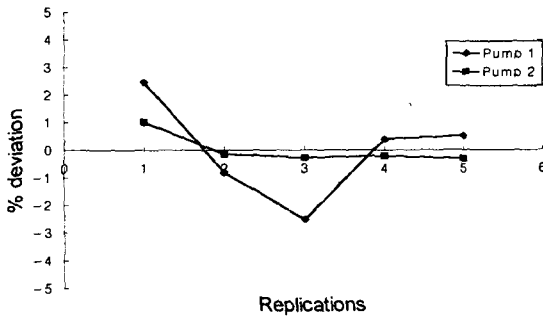


Fig. 16 Deviation in flow rate for the commercial metering pumps made by Blue White Inc.

나. 전기전도도

개발된 양액 자동조제 시스템의 양액조제 성능을 평가하기 위하여 전기전도도 제어를 수행하였으며 그림 17에 성능 곡선을 나타내었다. 양액의 농도는 23±1℃에서 평균오차 ±0.05 mS/cm의 범위에서 제어되었으며, 0.8 mS/cm에서 1.4 mS/cm까지 조제하는데 걸린 평균 정정시간은 15분이었다.

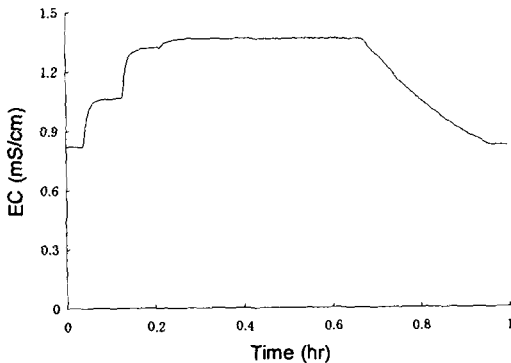


Fig. 17 Performance of EC control for the nutrient-solution mixing system developed.

상용 양액 자동조제 시스템과의 조제성능 비교를 위하여 네타팸사의 제품에 대한 전기전도도 제어성능 실험을 수행하였으며 그림 18에 성능곡선을 나타내었다. 이 때의 양액 온도는 23±1℃이고 설정치를 1.4 mS/cm로 하였을 때 300초에 대한 누적 평균이 1.29 mS/cm로 나타났다.

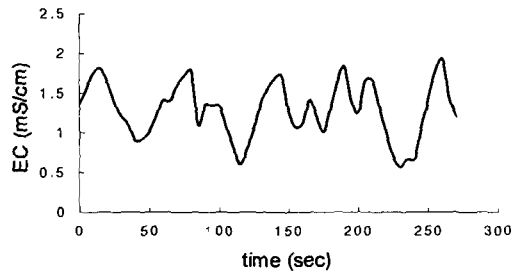


Fig. 18 Performance of EC control for the commercial nutrient-solution mixing system.

다. 산 도

개발된 양액 자동조제 시스템의 산도 제어를 수행하여 그림 19에 성능곡선을 나타내었다. 양액의 산도는 23±1℃에서 ±0.2 pH의 평균오차 범위 내에서 제어되었으며, 6.4 pH에서 6.0 pH까지 조제하는데 걸린 평균 정정시간은 15분이었다.

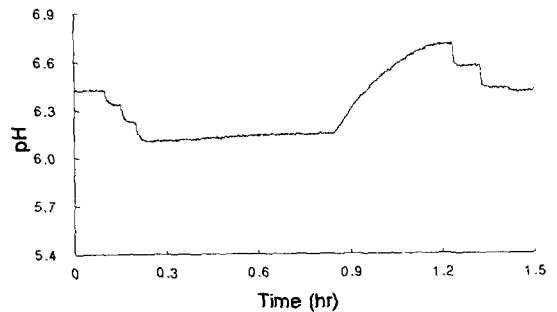


Fig. 19 Performance of pH control for the nutrient-solution mixing system developed.



상용 네타펌사의 제품에 대한 산도 제어성능 곡선은 그림 20에 나타내었다. 양액의 온도가  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 이고 설정치를 6.0 pH로 하였을 때 300초에 대한 누적 평균이 6.1 pH로 나타났다.

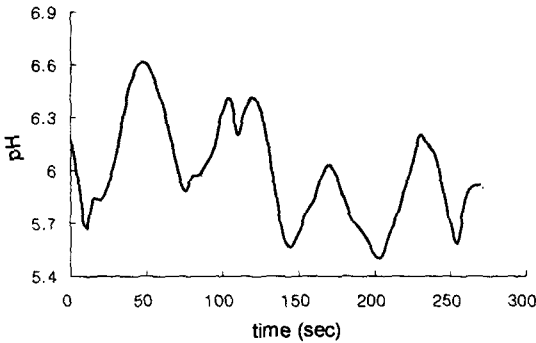


Fig. 20 Performance of pH control for the commercial nutrient-solution mixing system.

그림 21은 개발된 양액 자동조제 시스템을 이용하여 전기전도도 및 산도의 복합제어 실험 결과를 나타낸 것으로, 복합제어에 대한 시스템의 제어성능이 개별제어 실험의 평균오차 범위 이내에서 구현되었으며, 반복조제 실험에 대한 재현성도 우수하여 현장 적용에 큰 무리가 없을 것으로 사료되었다.

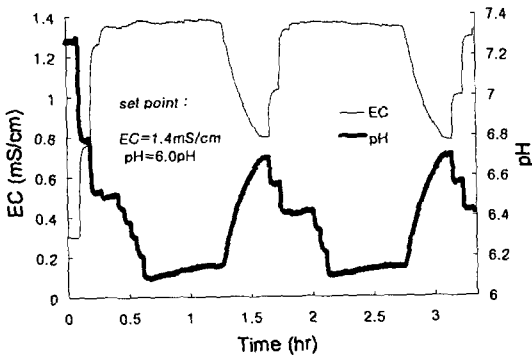


Fig. 21 Overall performance of EC and pH control for multiple steps of operation.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 액제 정밀계량장치를 이용한 양액 자동조제 시스템을 개발하기 위한 목적으로 수행되었으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 개발된 액제 정밀계량 장치의 구동시간과 배출유량과의 결정계수( $R^2$ )는 0.9999이며 선형회귀방정식은  $y=21.759x$ 로 나타났다.

2. 액제 정밀계량장치의 배출량 편차는  $\pm 0.33\%$ 로 나타났으며, 이 수치는 두 가지 형태의 상용 정량펌프의 배출량 편차인  $\pm 2.45\%$ ,  $\pm 1.38\%$ 에 비하여 작았다.

3. 액제 정밀계량장치를 이용한 양액 자동조제 시스템의 전기전도도와 산도에 대한 제어성능 실험을 수행하였다.  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 전기전도도는  $\pm 0.05 \text{ mS/cm}$ 의 평균오차 범위에서 제어되었으며,  $0.8 \text{ mS/cm}$ 에서  $1.4 \text{ mS/cm}$ 까지 제어하는데 걸린 평균 정정시간은 15분이었다. 산도제어는  $\pm 0.2 \text{ pH}$ 의 평균오차 범위에서 제어되었고,  $6.4 \text{ pH}$ 에서  $6.0 \text{ pH}$ 까지 제어하는데 걸린 평균 정정시간은 15분이었다.

4. 상용 제품에 대한 전기전도도와 산도의 제어성능 실험을 수행하여 개발된 시스템과 비교하였다. 상용 제품에 비하여 개발된 시스템의 제어성능은 비슷한 결과를 나타내었으며, 경제성 및 유지비용의 측면을 고려하여 우수함을 확인하였다.

5. 방울토마토를 이용한 실증실험을 통하여 개발된 양액 자동조제 시스템은  $\pm 0.05 \text{ mS/cm}$ 의 사역범위내에서 안정된 제어 성능을 보였으며, 이 결과로 장치의 신뢰성을 검증하였다.

#### 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. Okano, T., 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.
  8. Frank M. White. 1986. Fluid mechanics-2nd ed. McGraw-Hill Book Company.
  9. Robert L. Mott. 1994. Applied fluid mechanics-4th ed. Macmillan Publishing Company.
  10. LG. 1997. Chemical Resistance Table. LG.