

퍼지제어를 이용한 양액 자동공급 시스템 개발*

Development of an Automatic Nutrient-Solution Supply System Using Fuzzy Control⁺

황 호 준*	류 관 희*	조 성 인*	이 규 철**	김 기 영*
학생회원	정회원	정회원	정회원	정회원
H. J. Hwang	K. H. Ryu	S. I. Cho	K. C. Lee	G. Y. Kim

ABSTRACT

This study was carried out to develop a nutrient-solution mixing-and-supplying system, which used a low-cost metering device instead of expensive metering pumps and a fuzzy logic controller.

A low cost and precise overflow-type metering device was developed and evaluated by testing the flow discharge for the automatic nutrient-solution mixing-and-supplying system for small-scale hydroponic growers.

The fuzzy logic controllers, which could predict and meet the desired values of EC and supply rate of nutrient solution were developed and verified by simulation and experiment. this fuzzy logic controller, whose algorithm consists of four crisp inputs, two crisp outputs and nine rules, was developed to predict the desired value of EC and supply rate of nutrient solution and two crisp inputs, one crisp output and nine rules used to control EC to the desired values.

The nutrient-solution mixing-and-supplying system showed satisfactory EC control performance with the maximum overshooting of 0.035 mS/cm and the maximum settling time of 15 minutes in case of increasing 0.7 mS/cm. also, the accuracy of the overflow-type metering device in terms of the full-scale error was 2.29% when using solenoid valve only and 0.2% when using solenoid valve and flow control valve together.

주요용어(Key Words): 퍼지논리추론(Fuzzy Logic Inference), 지식기반(Heuristic Rule Base), 계량장치(Metering Device), 양액(Nutrient-Solution), 자동조제(Automatic Mixing)

1. 서 론

최근에 이르러 무공해 고품질의 농산물을 생산할 수 있는 장점 때문에 양액재배 농가들이 많이 늘고 있다. 이에 따라 값비싼 외국의 양액재배 시설을 대체할 국내의 기술에 의한 양액공급 제어기와 이의 구동 알고리즘 개발에 관한 연구가 많이 수행되고 있다. 특히, 양액의 정밀 계량장치와 농민이 사용하

기에 간단하고 조작하기 쉬운 전용제어기를 이용한 액체 자동공급시스템, 그리고 환경인자를 고려한 정밀한 양액 제어 알고리즘의 개발은 외국의 경우에서도 아직 찾아보기 힘든 첨단 연구로 우리의 양액재배 기술을 한 단계 높일 수 있는 것으로 그 필요성이 매우 크다고 할 수 있다.

이정훈(1997)은 소형 임펠러 펌프와 간단한 부자형 수위센서식 미터링 실린더 및 전자밸브로 조합된

* 본 연구는 농림수산부의 1997년도 현장애로기술사업개발 연구비 지원으로 수행되었음.

* 서울대학교 생물자원공학부 농업기계전공

** 마포산업 전자(주)

수위센서식 액체 정밀 계량 장치를 개발하여 정밀한 액체 제어를 가능케 했지만, 수위센서의 작동 불량 및 구동 알고리즘의 복잡함이 문제점으로 나타나 이를 개선할 필요성이 대두되었다.

박상근(1996)은 우리 나라 양액재배에 있어서 양액 조성 및 관리가 부적절하여 작물의 품질 및 수량이 안정적이지 못하다고 보고하였다. 이에 따라 전문적인 양액관리자 확보 및 전용 양액 제어기의 필요성이 대두되었으며 양액의 농도와 산도, 그리고 광합성에 직접적인 영향을 미치는 일사량과 온도 등의 생육환경정보를 이용한 복합적인 양액 제어알고리즘이 필요하게 되었다. 그리고 아직까지 환경인자를 이용한 기존의 수학적인 알고리즘은 적절한 양액 농도와 공급량과 같은 작물이 요구하는 양액 상태를 추론하기란 어려우며 기존의 ON-OFF 제어를 이용한 시스템은 아직 다양한 환경인자를 적용시키지 못하고 있는 실정이다.

일반적으로 지식기반 퍼지논리로써 추론과 예측이 가능하다고 하며 동적인 제어에도 기존의 고전적인 제어보다 우수한 경향을 보인다고 한다. 그러므로, 생육단계, 일사량, 온도, 상대습도에 따른 공급될 양액의 농도와 공급량이 예측 가능하도록 알고리즘을 개발하여, 양액을 조절하는데 적용시킨다면 적절한 양액관리가 이루어질 것으로 사료된다.

본 연구의 목적은 퍼지제어기를 이용하여 온도, 습도, 일사량, 생육시기, EC 등의 생육정보를 바탕으로 양액의 공급량 및 농도를 제어함으로써 작물생육에 적절한 양액을 공급하는 양액 공급시스템을 개발하는 것이다. 본 연구의 그 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 오버플로우식 액체 정밀계량 장치를 개발하여 양액 자동 조절 및 공급 시스템을 개발한다.
2. 생육단계, 일사량, 온도, 상대습도를 이용하여 양액의 농도 및 공급량을 예측할 수 있는 지식기반 퍼지 제어알고리즘을 개발한다.
3. 농도조제 퍼지제어 알고리즘을 개발한다.
4. 내장형 제어기(embedded computer) 및 A/D 변환기, 액정화면을 이용한 양액 조절 및 공급 시스템 전용제어기를 개발하고 개발된 시스템의 조절 성능을 평가한다.

2. 재료 및 방법

가. 양액 자동 공급 시스템 개발

1) 오버플로우식 액체 정밀계량 장치 개발

기존의 수위센서식 액체 정밀 계량장치의 문제점을 해결하고 일정한 액면을 유지시키기 위하여 오버플로우식 액체 정밀 계량 장치를 새롭게 개발하였다. 이 장치는 유체 정역학적 원리를 이용하여 수위센서를 사용하지 않고도 액면을 일정하게 유지하기 때문에 가격이 저렴하고 내구성이 향상되고 구동 알고리즘이 단순화되었다. 작동 방식은 계량 용기 상부의 유입부에서 미터링 실린더 내부의 액면까지 액체를 계속해서 공급하면, 일부는 배출되며 나머지는 계량용기에서 넘쳐흘러 바이패스(bypass)관을 통하여 다시 농후 배양액통으로 재유입된다. 따라서 농후 배양액은 계량용기에 일정한 양이 담겨있는 상태가 되며, 항상 일정한 수위에서 전자밸브 구동시간 동안 동일한 압력으로 배출된다(그림 1). 계량용기 하단의 배출부에는 솔레노이드 밸브와 유량조절 밸브를 설치하였고, 소형 마그네틱 펌프를 사용하여 농후 배양액을 계량 용기로 공급하였다.

2) 외형 프레임 제작

양액 조절 및 공급 시스템은 위에서 제작된 액체 정밀 계량 장치와 원수공급 및 혼합용 탱크,

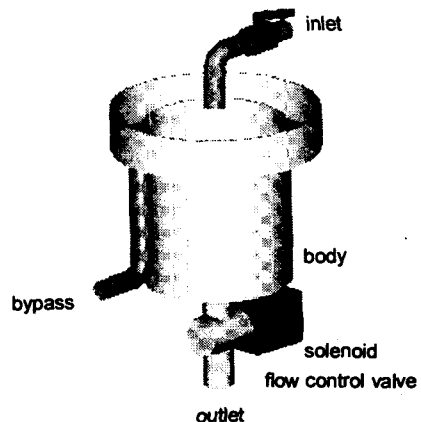


Fig. 1 Shape of overflow cylinder.

양액 혼합과 공급용 펌프, 배관 등으로 구성된다. 혼합 탱크의 사용가능 용량은 약 800 리터이며, 배관은 20mm, 25mm의 PVC 파이프를 이용하였다. 그림 2는 알루미늄 외형 프레임과 양액 공급 파이프 배관을 이용한 시스템 구성을 나타낸 것이다.

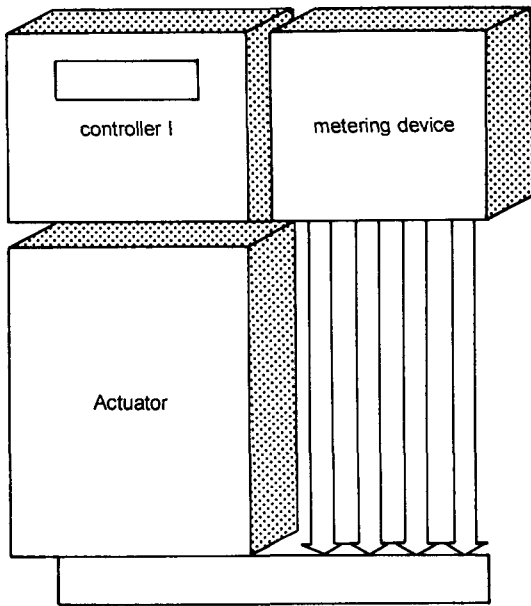


Fig. 2 Structure.

나. 예측 및 조제 알고리즘 개발

1) 예측 알고리즘 개발

일사량, 온도, 습도, 생육단계 등의 생육인자를 이용하여 양액의 농도 및 공급량을 예측하는 퍼지알고리즘을 개발하였다. 알고리즘 개발은 먼저 작물의 생육에 절대적인 영향을 미치는 생육인자를 결정하고, 둘째로 결정된 주된 생육인자에 따른 양액의 농도 및 공급량 사이의 관계를 규명하며, 셋째 이들 상호관계를 이용하여 각각의 입출력 귀속도 함수 및 규칙을 개발하여 양액 농도 및 공급량을 예측할 수 있도록 하였다.

예측에 사용될 규칙들은 전문가(원예연구소 김광용박사, 호남원예시험장 서범석박사 등)들의 의견과 연구문헌을 참고하여 개발되었으며, 일반적으로 습도가 낮으면 공급량을 증가시키고 습도가 높으면 공급량을 줄여서 작물의 습해 및 고습으로 인한 병해를 줄이고자 하였다. 또한, 작물의 생육단계에 따라 양액의 농도를 증가시키면서 작물 수확기 때에는 농도를 낮춰주는 방향으로 규칙을 작성하였다. 일사량이 높으면 농도를 낮춰주는 것이 좋기 때문에 이에 따라서 규칙을 작성하였다(표 1). 또한, 입력 귀속도 함수는 다음 그림 3에, 출력 귀속도 함수는 그림 4에 나타내었다.

Table 1 Decision table for set point of EC and supply amount

	Temperature			Solar Radiation			Relative Humidity			Growth Period			EC					Supply amount			
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	S	C	H	VL	L	M	H	VH	L	M	H	
R 1.			■																		■
R 2.						■															
R 3.																					
R 4.												■									■
R 5.												■									■
R 6.		■																			■
R 7.																					
R 8.													■								■
R 9.																					■

VL : very low L : low M : medium H : high VH : very high S : seedling C : culture
 H : harvesting R1 ~ R9 : rules

2) 조제 알고리즘 개발

예측된 양액 농도를 조제하는 데에는 총 9개의 규칙이 이용되었으며, 규칙은 시행착오법을 거쳐서 작성하였다. 입력 퍼지변수로는 설정치와 현재 농도

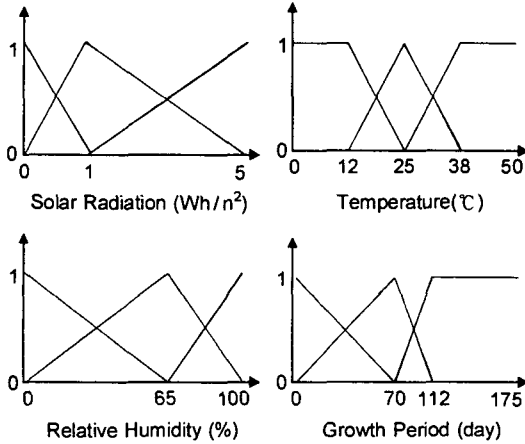


Fig. 3 Input membership function for setpoint prediction.

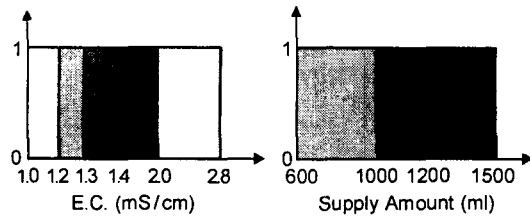


Fig. 4 Output membership function for setpoint prediction.

차, 현재농도와 이전 농도차의 각각 두 개의 오차 및 오차 변화신호를 이용하였다. 출력 퍼지변수로는 농후 배양액 공급시간으로 하였다. 귀속도 함수는 시행착오법을 이용하여 정정시간을 최대한 줄이도록 개발하였다. 표 2는 양액 조제 알고리즘에 사용된 9개의 규칙을 나타낸 것이며 입출력 귀속도 함수를 그림 5, 6에 나타내었다.

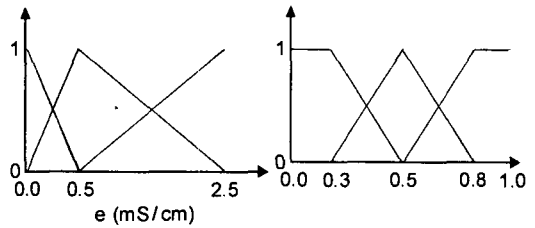


Fig. 5 Input membership function for EC control.

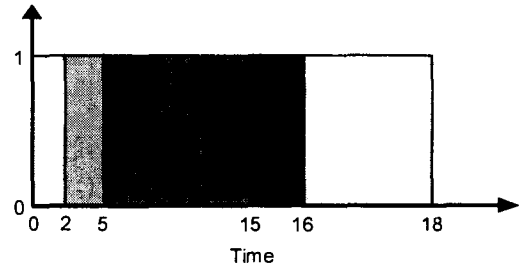


Fig. 6 Output membership function for EC control.

Table 2 Decision table for condense-nutrient-solution supply in EC control

	e			Δe			supply time				
	EL	EM	EH	EEL	EEM	EEH	t1	t2	t3	t4	t5
R 1.											
R 2.											
R 3.											
R 4.											
R 5.											
R 6.											
R 7.											
R 8.											
R 9.											

EL: low error

EM: medium error

EH: high error

t1~t5:

EEL: low error change

EEM: medium error change

EEH: high error change

supplytime

다. 양액 전용 제어기 개발

양액 공급을 위한 전용 제어기는 내장형 제어기, 입력용 자판, A/D 변환기, 액정화면, 센서 신호처리기로 구성되어 있다.

내장형 제어기(PC86)는 국산 자체 기술로 제작된 Single board PC로서, IBM-PC와 100% 호환을 이루며, 제어 알고리즘에 의하여 양액 공급 장치의 동작을 제어한다.

입력용 자판은 A~Z까지의 알파벳 등의 버튼으로 이루어져 있어 사용자로부터 제어기의 작동에 필요한 정보를 입력 받는다. 제어기에 사용될 데이터 입력보드는 양액의 농도, 일사량, 온도, 습도센서 등 4개 신호와 양액 계측을 위한 pH 및 온도신호 2개 등 총 6개 신호 채널을 가지고 있는 보드를 사용하였다. 또한, 원수 탱크의 수위 검출과 8개의 작동기를 구동시키기 위하여 디지털 입력 1채널, 디지털 출력 8채널을 가지고 있는 디지털 입출력 보드를 사용하였다. 제어기 전용 모니터로서는 640 × 200 화소를 가지는 백라이트 부착 액정화면을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 액제정밀계량장치 토출량 실험

개발된 액제 정밀 계량장치를 이용하여 원수의 토출량 실험을 수행하였다. 10개의 솔레노이드 밸브간의 토출량 편차 실험의 결과를 그림 7에 나타내었다. 10개의 솔레노이드 밸브의 토출량 편차를 5회에 걸쳐 10초 동안 구동한 성능평가 결과 솔레노이드 밸브 사이의 토출량 편차는 최대 2.29%로 나타났다.

토출량 편차를 줄이기 위하여 솔레노이드 밸브 하단에 유량조절 밸브를 설치하여 각각 유량을 조절하면서 실험한 결과 10개의 솔레노이드 밸브 중 토출량 편차가 가장 컸던 두 밸브 사이의 토출량 편차를 그림 8에서 나타난 바와 같이 최대 0.2% 이내까지 줄일 수 있었다.

밸브의 구동시간과 배출량의 관계를 그림 9에 나타내었으며 회귀방정식을 식 (1)에 나타내었다.

구동시간과 배출량과의 결정계수(R^2)는 약 1로 나타났다으며 구동시간을 이용하여 액제 정밀 계량 장치의 제어가 가능함을 확인하였다.

$$\text{Discharge(g)} = 18.59 \times \text{Time (sec)} \dots\dots\dots (1)$$

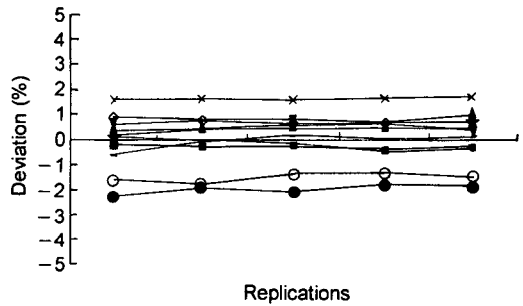


Fig. 7 Deviation in flow rate using sol. valve only.

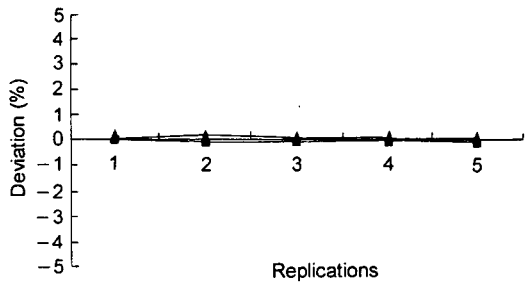


Fig. 8 Deviation in flow rate using sol. and control valve.

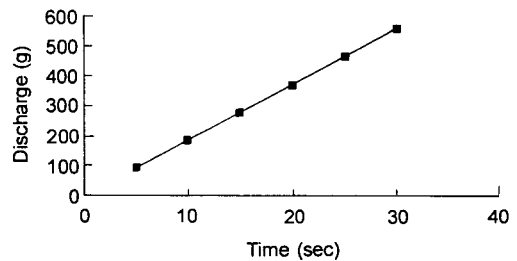


Fig. 9 Regression curve of the metering device.

나. 예측 및 제어 알고리즘

1) 농도 및 공급량 예측 알고리즘

개발된 농도 및 공급량 예측알고리즘의 타당성을 검토하기 위해서 농도변화에 가장 크게 영향을 미친다고 판단되는 입력 퍼지 언어변수인 일사량과 생육 단계를 변화시키면서 농도의 변화 추이를 고찰하였고, 공급량에 가장 큰 영향을 미친다고 판단되는 온도와 습도를 변화시키면서 공급량을 추이를 고찰하였다. 농도 예측알고리즘 수행 결과 그림 10과 같이 일사량이 증가할수록 양액 농도가 낮아지고, 생육단계에 따라 적절히 변화하는 것을 관찰할 수 있었다.

그림 11은 일사량을 $3\text{Wh}/\text{m}^2$, 생육시기를 정식 후 70일로 유지시키고, 온도를 28°C 에서 50°C 까지, 습도를 30%에서 100%까지 변화 시켰을 때의 공급량 예측알고리즘 수행 결과를 나타낸 것이다. 여기서 x축은 상대습도, y축은 외기온도, z축은 공급량을 나타낸다. 그림에서 온도가 증가할수록 공급량이 증가하며 습도가 증가할수록 공급량이 감소함을 알 수

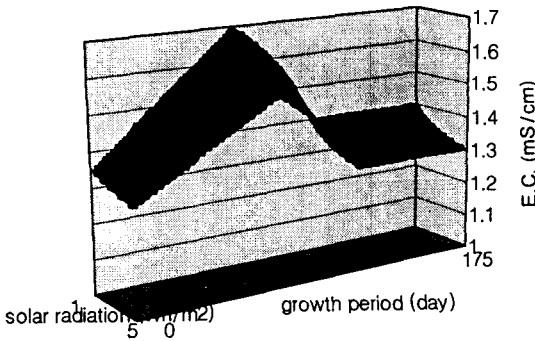


Fig. 10 Simulated variation in EC.

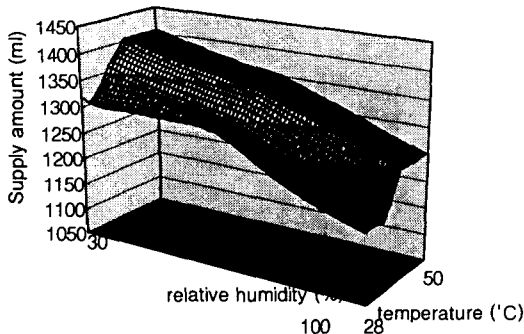


Fig. 11 Simulated variation in supply amount.

있는데 특히, 온도가 매우 높고(50°C) 습도가 매우 낮은(30%) 상태에서의 공급량은 $1,405\text{ml}$ 이며, 온도가 매우 낮고(28°C) 습도가 매우 높은(100%) 상태의 공급량은 $1,179\text{ml}$ 이어서 고온·저습의 이전 상태의 공급량보다 226ml 적게 공급함을 알 수 있다. 전체적으로 고온과 저습에서 공급량이 높아지며, 저온과 고습에서 공급량이 적어짐을 보여서 전문가의 의견에 잘 부합되어 퍼지제어에 의한 공급량 예측이 타당함을 알 수 있다.

2) 제어 알고리즘

설정된 양액 농도를 제어하는 알고리즘을 개발하였는데 그림 12~14와 같은 제어 응답 특성을 보였다. 그림 12는 초기 양액 농도가 $0.8\text{mS}/\text{cm}$ 인 양액을 설정 농도인 $1.0\text{mS}/\text{cm}$ 으로 제어하는 응답을 나타낸 그래프로서 농후액을 약 7.8초, 4.1초 공급하여 원하는 설정 농도에 도달함을 나타낸 것이다. 마찬가지로 그림 13, 14도 초기 농도와 설정농도의 차이

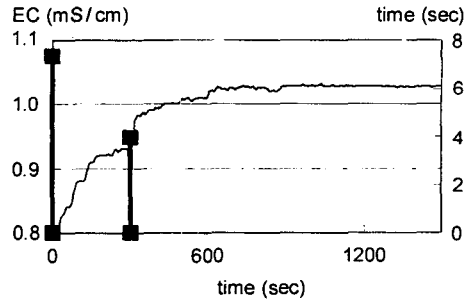


Fig. 12 Time response of EC control for an increase of $0.2\text{mS}/\text{cm}$.

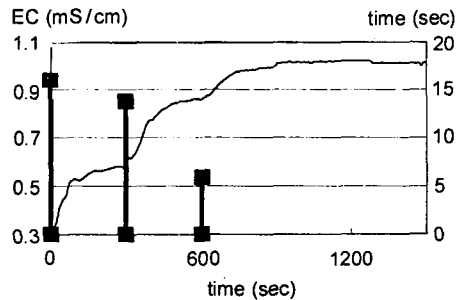


Fig. 13 Time response of EC control for an increase of $0.7\text{mS}/\text{cm}$.

가 각각 0.7mS/cm, 1.3mS/cm이었을 경우 조제응답을 나타낸 그래프이다. 그림에서 검정 막대는 농축 배양액 공급시간을 나타낸 것이다. 그림 15은 농도 차에 따른 정정시간의 변화를 나타낸 것이다. 그림 11에서 초기 농도와 설정농도의 차이가 0.0mS/cm~0.7mS/cm인 경우 정정시간은 약 15분이었으며, 0.7mS/cm~1.3mS/cm인 경우 최대 25분이 소요되었다. 또한 전 범위에서의 최대 오버슈트는 약 0.035mS/cm로 나타났다. 이 결과를 이정훈(1997)의 연구결과와 비교해 보면 0.05mS/cm에서 0.035mS/cm로 제어성능이 향상되었으며 모든 설정 농도에서 안정적인 정정시간을 보이고 있다.

다. 전용제어기 및 시스템

양액 조제 및 공급시스템을 위한 퍼지 전용 제어기를 개발하였다. 전용제어기는 keymatrix와 LCD를 통하여 사용자가 수동 및 자동 조제와 공급 모드를

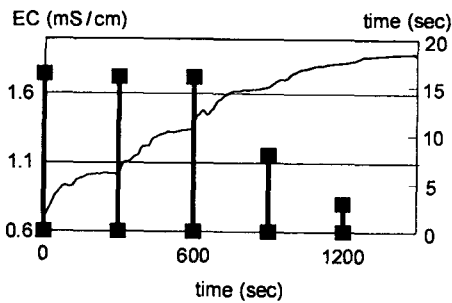


Fig. 14 Time response of EC control for an increase of 1.3mS/cm.

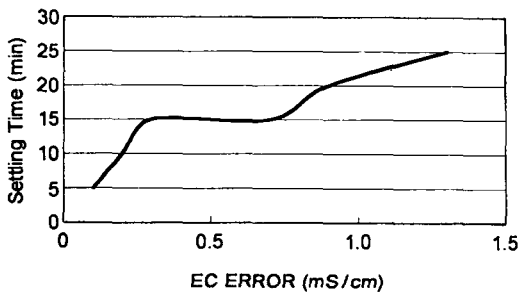


Fig. 15 Settling time vs difference in EC.

선택 가능하도록 하였으며, 시스템과는 별개로 독립적으로 개발하여 유지 및 보수가 용이토록 하였다. 또한 비정상적으로 전원이 끊겼더라도 전원이 들어오면 이전의 정보를 기억하고 있어 자동적으로 프로그램이 수행되어 양액을 자동 조제 및 공급하도록 하였다. 그리고 이를 이용하여 전체 시스템을 완성하였다.

다음 그림 16와 17은 각각 개발된 제어기와 시스템을 나타낸 것이다.

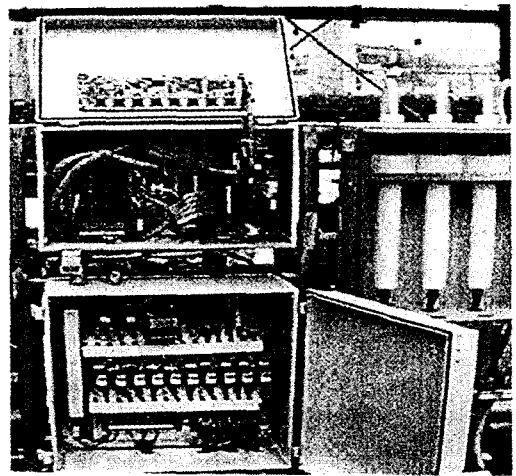


Fig. 16 View of controller developed.

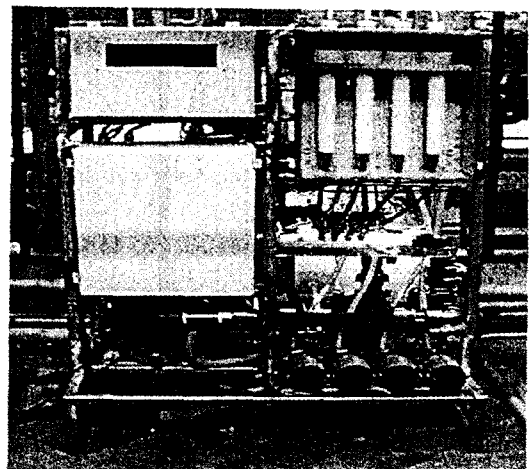


Fig. 17 View of system developed.

4. 요약 및 결론

본 연구는 퍼지 제어에 의한 양액 전용 제어기 개발을 위한 목적으로 수행되었으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 정밀한 액체 계량을 위하여 오버플로우식 액체 정밀 계량 장치를 개발하였으며 이를 이용한 양액 자동 제어 및 공급 시스템을 개발하였다.

2) 오버플로우식 액체 정밀 계량 장치의 토출량 실험 결과, 솔레노이드 밸브만을 이용하였을 경우에는 밸브간 토출량 편차는 최대 2.29%로 나타났으며, 유량 조절밸브를 이용하여 토출량을 조정할 후에는 0.2%로 줄어 들었다.

3) 자료 조사를 통하여 작물의 생육에 영향을 미치는 인자를 일사량, 온도, 습도, 생육단계로 설정하였으며 이에 대한 양액 농도 및 공급량의 귀속도 함수와 9개의 규칙을 개발하였다. 또한 개발된 예측 귀속도 함수와 규칙을 이용하여 양액 농도 및 공급량 예측용 퍼지 제어 알고리즘을 개발하였다.

4) 제어 입력변수를 오차와 오차 변화율로 결정하고 이에 대한 귀속도 함수와 9개의 규칙을 시행착오법을 통하여 개발하였으며, 이를 이용한 양액 제어 퍼지 제어 알고리즘을 개발하였다.

5) 제어 성능 실험을 실시한 결과 초기 농도와 설정 농도의 차이가 0.7mS/cm 범위 내에서 정정시간은 약 15분이었으며, 이 범위에서의 최대 오버슈트는 0.035mS/cm이었다.

6) 개발된 알고리즘과 내장형 제어기를 이용하여 한글 입출력이 가능한 양액전용 제어기를 개발하였다.

참 고 문 헌

1. 이정훈. 1997. 액체 정밀계량 장치를 이용한 양액 자동제어 시스템 개발. 서울대학교 공학석사학위논문.
2. 박상근. 1996. 배양액의 농도결정과 관리 및 교환. 과학원에. 81.