

원칩 마이크로 컴퓨터를 이용한 양액 자동 조제 장치의 개발

Development of Automatic Nutrient-Solution Controller Using Single-chip Microcomputer

오길근*	류관희*	홍순호**	김효중*
	정희원	정희원	
K. K. Oh	K. H. Ryu	S. H. Hong	H. J. Kim

ABSTRACT

This study was conducted to develop an automatic nutrient control system for trickle application of nutrient solution. Temperature, electric conductivity(EC), pH and dissolved oxygen(DO) were selected as control variables. A controller using single-chip microcomputer was constructed.

An automatic control system for nutrient solution and a controller using single-chip microcomputer with control algorithm were developed. The control system was tested, and could control temperature, EC and pH within the error ranges of $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.2\text{mS/cm}$, $\pm 0.1\text{pH}$, respectively.

주요용어(Key Words) : 양액(nutrient solution), 양액 제어(nutrient solution control), 싱글-칩 마이크로컴퓨터(single-chip microcomputer), 산도(pH), 전기전도도(electric conductivity)

1. 서론

최근 우리 나라는 농산물의 시장개방이라는 심각한 문제에 직면해 있으며, 이러한 위기상황을 극복하기 위한 대책이 시급히 요구되고 있다. 이러한 가운데 자본과 기술이 집약적으로 투입된 원예시설을 이용한 고품질의 농산물을 생산하여 국제 경쟁력을 갖추려는 농가들이 늘어나고 있다. 또한, 고급 원예시설의 경우 토양 재배

시 문제가 되고 있는 연작장해, 생산성의 감소, 그리고 품질의 저하를 줄이기 위하여 양액재배 방식을 채택하고 있다.

양액재배에서는 영양분이 식물체의 흡수에 적합한 형태로 존재하기 때문에 영양분으로 인한 생육 제한요인을 제거할 수 있어 밀식이 가능하고, 무기염의 이용효율을 향상시킬 수 있다. 또한, 수분부족으로 인한 스트레스를 거의 받지 않게 되고, 공급과 제어의 측면에서 생력화 및 자

* 서울대학교 농공학과
** 마포산업전자(주)

동화의 비율을 높일 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 작물 생육환경이 부적절하게 조절될 경우에는 대상 작물 전체에 걸쳐, 치명적인 피해를 입게 되며, 작업에 요구되는 노동력이 매우 크기 때문에 이에 따른 자동화가 절실히 요구되고 있다.

작물이 정상적으로 생육, 개화, 결실을 거쳐 종자를 형성하기 위해서는 탄소(C), 산소(O), 수소(H), 인(P), 칼륨(K)을 포함한 16종류의 원소가 반드시 필요한 것으로 알려져 있다. 이 중 탄산가스(CO₂)로부터 공급되는 탄소와 산소를 제외한 원소는 대부분이 뿌리를 통해서 흡수되기 때문에 원칙적으로 양액 중에는 이와 같은 원소들이 적당한 비율로 존재해야 한다.

또한, 작물에 따라 이와 같은 원소들의 요구량은 조금씩 다르며, 재배조건이나 생육단계에 따라서도 변화하기 때문에 작물의 종류에 따른 양액의 조성도 달리해야 할 필요가 있다. 특히 과채류의 경우에는 생육단계에 따른 농도 변화가 있어야만 작물이 정상적인 생육을 이룰 수 있다. 이러한 다양한 조건에 대하여 양액 상태의 용이한 변경과 정확한 조절을 위한 양액 자동조제장치의 개발이 시급히 요청되고 있다.

현재 대부분의 시설원에 농가에서는 직접 비료를 섞어서 양액을 조제하여 공급하거나, 이미 조제된 농축 양액을 일정한 비율로 혼합시킬 수 있는 액비혼입기를 사용하여 공급하고 있기 때문에 작물에 적절한 양액의 상태를 정확하게 조절하지 못하고 있다.

양액의 조제는 농축원액을 물에 희석시키거나 직접 양액 탱크에 물을 넣고 고품질 비료를 적당한 비율로 섞는 방법으로 이루어지고 있다. 고품질 비료를 이용하는 방법보다는 농축원액을 물에 희석시키는 방법이 자동화에 적합하며, 실제로 일부의 양액재배 시설에서 물의 흐름에 따라 일정한 비율로 농축원액이 흘러들어가 혼합되는 개루프 제어방식이 이용되고 있다.

그러나, 이러한 개루프 제어방식의 양액조제 방법은 몇가지 문제점을 안고 있다. 첫째, 물과 농축원액과의 정확한 혼합이 어렵다. 일정한 비

율로 혼합되기 위해서는 혼입기를 통과하는 유속이 일정하게 유지되어야 한다. 둘째, 작물의 종류, 생육단계에 따라서 농도의 변경이 어렵다. 유체역학적인 원리를 이용한 간단한 장치이므로, 혼합비의 변경이 어렵다. 셋째, 순환식 재배법에서의 경우 개루프 방식의 제어는 부적합하다. 환경문제로 인한 순환식 재배방식으로서의 전환은 불가피한 것으로 생각되며, 작물의 선택적 이온의 흡수로 인하여 회수된 양액내의 이온의 불균형이 발생하므로 페루프 제어 방식이 요구된다.

일반적으로 수용액 내의 산도, 전기전도도, 용존산소량 등은 온도에 따라 변화하기 때문에 양액 조제시 양액의 온도는 일정하게 유지되어야 하며 공급 과정에서 온도 변화를 줄여야 한다고 보고되고 있다. 예를 들어, 전기전도도의 경우 온도가 1°C 변화함에 따라 2% 가량 변화하는 특성을 보이며, 용존산소량의 포화수준도 온도의 증가에 따라 크게 감소한다(關山 등, 1988).

양액의 산도(pH)에 따라 양액의 흡수 이온의 종류가 변화하며, 낮은 산도에서 음이온의 흡수가 용이하고, 반대로 높은 산도에서 양이온의 흡수가 빨라진다는 연구 결과가 보고되었으며, 낮은 산도에서는 양액중의 이온간에 침전이 생기기 쉽다.

본 연구는 위와 같은 온도, 전기전도도, 산도, 용존산소량으로 대표되는 양액 상태의 정확한 계측 제어를 위한 페루프 방식의 양액 자동조제장치를 개발하기 위해 수행되었다.

3. 재료 및 방법

가. 양액 자동 조제 시스템 설계시 고려 사항

양액의 액온, 산도(pH), 전기전도도(EC), 용존산소량(DO)의 계측 및 제어가 가능한 양액 자동조제장치를 구성하였으며, 싱글칩 마이크로 컴퓨터를 이용한 양액 조제 전용 콘트롤러를 제작하였다. 이 장치의 설계시 고려 사항은 다음과

같다.

1. 제어의 정밀도 및 안정성의 향상
2. 각 제어대상에 대한 설정점(set point)의 변경 용이성
3. 제어상태의 온라인 모니터링
4. 제어 시스템의 신뢰성과 조작 용이성의 향상
5. 정확한 양액의 조제를 위한 각 제어 대상간의 우선 순위 결정

나. 양액 계측 시스템의 구성

양액 탱크내 양액의 온도, 농도(전기전도도), 산도, 용존산소량을 계측하고, 이를 환경제어의 피드백 신호로 활용하기 위하여, 양액 환경계측 시스템을 구성하였다. 표 1에 양액 환경계측 시스템에 사용된 각 신호발신기의 구체적인 명세를 나타내었다.

모든 신호발신기의 출력은 4~20mA의 전류 신호로서, 1~5V의 전압으로 변환하여 양액 조제 컨트롤러의 8 비트 해상도를 갖는 A/D 변환 포트에 입력되도록 하였다.

양액 온도의 계측을 위한 센서로는 백금 측온 저항체(Pt-100)를 선정하였다. 백금 측온저항체는 상온 범위에서의 정밀 측정이 용이하다는 장점을 가지고 있다.

Table 1. Specifications of the instruments

Measurand	Temp.	pH	EC	DO
Manufact.	Mapo Tech. <Korea>	Hanna Inst. <Italy>	Hanna Inst. <Italy>	Mapo Tech. <Korea>
Range	0~40 °C	0~14 pH	0~19.99 mS/cm	0~30 ppm
Resolution	0.1°C	0.01pH	0.02 mS/cm	0.1ppm
Accuracy	± 0.1°C	± 0.02 pH	± 2% F.S.	± 0.2 ppm
Sensor type	Resistance type	Glass electrode	Impedance type	Galvanic cell
Output	4~20 mA	4~20 mA	4~20 mA	4~20 mA

산도(pH)는 측정요소 시간과 전자회로 결합에 의한 자동화의 용이성, 정밀, 정확도 등을 고려하여 유리전극법을 선정하였다.

전극 사이를 통하여 흐르는 전류는 양액 중에 포함된 무기양분의 농도와 비례하기 때문에 양액의 농도 변화에 따라 두 전극 사이의 전기전도도가 변화하게 된다. 따라서, 검출장치의 전극에 일정한 전압을 걸고, 양액을 통하여 흐르는 전류를 측정하면 전기전도도가 계산되며, 이를 이용하여 양액의 농도를 간접적으로 측정할 수 있도록 하였다.

용존산소량 센서는 대전극(對電極)으로 사용한 납이 알칼리 전해액 중에서 산화되고, 양액 중의 산소가 반응전극에서 환원되면서 산소 농도에 비례하는 전류를 발생시키는 갈바니 셀(galvanic cell)의 원리를 이용하였다.

양액의 수위를 계측하기 위하여 리드 스위치(reed switch)를 이용하여 간단한 구조의 수위 측정 센서를 제작하였다. 이러한 방식의 수위 센서는 수위의 연속측정은 불가능하지만, 양액 탱크 안쪽으로의 물의 공급과 양액 탱크 밖으로의 양액 배출을 고려할 때, 최소 2점의 위치만을 인식하면 양액의 조제와 공급이 가능하게 된다.

다. 양액 제어 시스템의 구성

본 연구에서는 양액의 온도, 농도, 산도, 용존 산소량의 제어를 위하여 각 제어 대상에 대응하

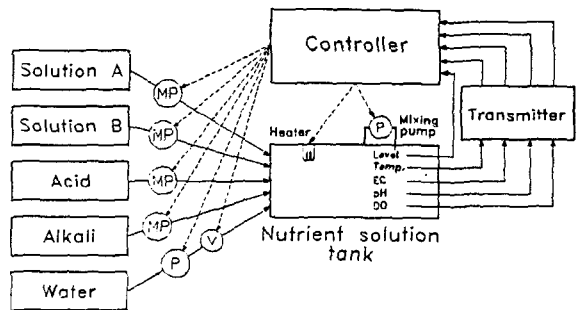


Fig. 1. Schematic diagram of nutrient control system.

는 구동장치들을 부착하였다. 그림 1은 제작된 제어 시스템의 개략도를 나타낸 것이며, 표 2는 각 구동장치의 명세를 나타낸 것이다.

Table 2. Specifications of system components

Components	Specification
Metering pump	Diaphragm type, Black stones, Italy, 110V, 4EA
Mixing pump	Sinhanil Electric, 101W, 110V, 1EA
Water supply pump	Sinhanil Electric, 34W, 110V, 1EA
Heater	Techniseh Co., 2 kW, 110V, 1EA
Solenoid valve	Jinyoung Electric, 110V, 1PT, 1EA

본 연구에서 채택한 양액 조제 방식은 배치(batch)형이므로 1회 공급량을 조절할 수 있는 용량의 양액 탱크가 선정되어야 한다. 양액 탱크 용량의 선정에 있어서 고려되어야 할 요소는 작물 1株당 공급량, 재배면적, 재식밀도, 급액계획으로 결정하였다. 1회 공급량은 식 (1)과 같이 계산된다.

양액 탱크의 용량

$$= \frac{\text{재식밀도} \times \text{재배면적} \times \text{주당 공급량}}{\text{급액 계획상 분할할 면적의 개수}} \dots\dots (1)$$

총 재배 면적이 300 평(991.71m²)인 온실을 기준으로 하고, 작목을 토마토로 하였을 때, 표 3과 같은 급액 설계가 가능하며, 이에 기준하여 양액 탱크의 용량을 200ℓ로 선정하였다.

Table 3. An example planning on supplying nutrient solution

Area	1000m ²
Planting density	4 plants/m ²
supplying amount	117 ml/plant
supplying method	supplying 1/3, total area in rotation

농축 배양액은 성분 이온간의 화학적 반응에 의한 침전을 막기 위하여 A, B의 두 종류로 분리하여 조제하는 방식을 택하였으며 이들을 공

급하기 위하여 두개의 탱크를 사용하였다. 또한 양액 산도의 조절을 위하여 고농도의 산, 알칼리를 담은 탱크를 설치하였다. 농축배양액 탱크, 산, 알칼리 공급용 탱크의 용량은 각각 20ℓ로 선정하였다.

양액 탱크내에 물을 공급하기 위하여 물 공급용 펌프와 솔레노이드 밸브를 선택하였다. 물공급용 펌프는 취급이 용이한 원심펌프를 이용하였으며, 프라임(priming)의 자동화와 수위차에 의한 자연 급수를 막기 위하여 솔레노이드 밸브를 사용하였다.

100~1000배의 배율로 농축된 양액과 양액의 산도 조절용 산, 알칼리를 양액통 내로 정량적으로 공급하기 위하여 정량펌프를 사용하였다. 사용된 정량펌프는 다이어프램을 이용한 용적형 펌프로서 전자석에 의해서 일정한 행정을 움직여서 토출되는 원리로 작동된다. 산도 조절용 산, 알칼리 그리고 농축배양액과의 화학적 반응을 막기 위하여 내화학성과 내구성이 강한 강화 폴리프로필렌(polypropylene)을 이용한 것을 선정하였으며, 조제 중에는 정량펌프의 단위시간당 토출량을 일정하게 유지하고 작동시간의 조절에 의해 공급량이 조절되도록 하였다.

양액내의 용존산소량의 부족을 막기 위하여 낙차를 이용한 산소 공급 방식을 이용하였다. 별도의 산소 공급용 폭기펌프를 사용하지 않고 양액 혼합에 사용되는 혼합 펌프를 이용하여 용존산소량이 증가되도록 하였다. 양액탱크 하단부에서 교반용 펌프로 양액을 흡입하여 양액탱크 상단부로 배출시켜 양액이 수면위로 떨어지도록 하였다. 떨어지는 과정에서 대기와의 접촉면적이 증가하기 때문에 산소의 혼입량이 증대되는 현상을 이용하여 양액 내의 용존산소량이 포화되도록 하였다.

라. 양액 조제 알고리즘의 개발

본 연구에서 제작된 양액 조제 장치를 이용하여 작물이 흡수하기에 적합한 양액을 조제하기 위한 양액 자동조제용 소프트웨어를 개발하였

다. 그림 2 에 개발된 양액 자동조제용 소프트웨어의 흐름도를 나타내었다.

정확한 양액의 조제를 위하여 각 양액 상태변수들 간의 조절 순서를 결정하였다. 양액의 농도는 전기전도도로서 측정하기 때문에 산도 조절시 공급되는 산, 알칼리에 의해 전기전도도가 영향을 받아 농축배양액이 적당량 공급되기 전에 설정값에 도달하는 것을 방지하기 위하여 양액의 농도 제어가 완전히 끝난 후에 산도와 용존산소량의 조절이 이루어지도록 하였다.

성을 가지고 있으므로 양액 온도가 조절기간 동안 계속하여 조절되도록 하였다.

각 양액 상태변수들은 ON/OFF 제어 방식에 의하여 제어되도록 하였다. 또한 제어의 안정성을 기하기 위하여 각 양액상태변수들의 설정값과의 오차가 사역 범위(온도 : $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, EC : $\pm 0.3\text{mS/cm}$, pH : ± 0.3) 내에 들었을 때 제어를 끝내도록 하였으며, 제어 및 계측 주기를 0.1초가 되도록 하였다.

마. 싱글칩 마이컴을 이용한 콘트롤러 개발

본 연구에서는 싱글칩 마이크로 컴퓨터를 이용하여 양액 조제 전용 콘트롤러를 개발하였다. 콘트롤러에 사용된 싱글칩 마이크로 컴퓨터는 미국 MOTOROLA 社의 MC68705로서 32개의 데이터 입출력용 핀을 가지고 있으며, 이중 4 채널의 A/D 변환이 가능하다.

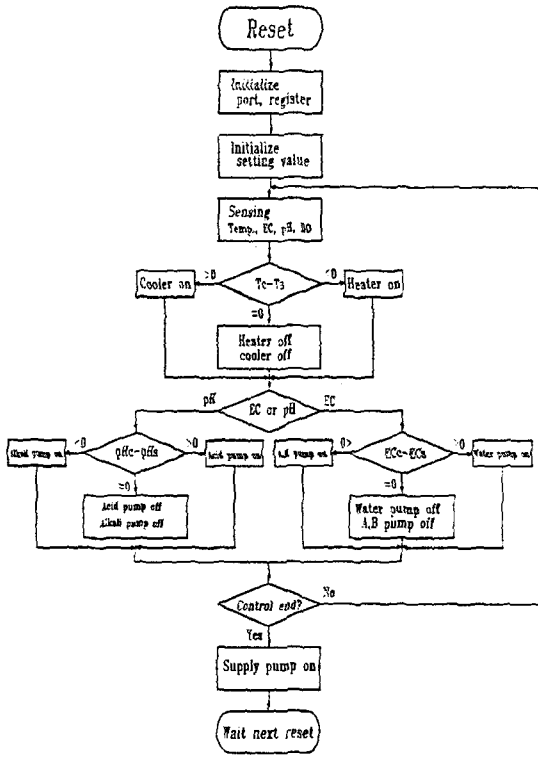


Fig. 2. Flow chart of the nutrient solution control algorithm.

또한 용존산소량의 조절과 농축배양액의 혼합을 촉진하고, 양액 탱크 내의 농도, 산도의 구배가 생기지 않도록 하기 위하여 양액 조제가 시작되는 시각부터 공급되는 시각까지 계속하여 혼합펌프가 작동되도록 하였다. 각 양액 상태변수들은 온도의 변화에 따라 약간씩 변화하는 특

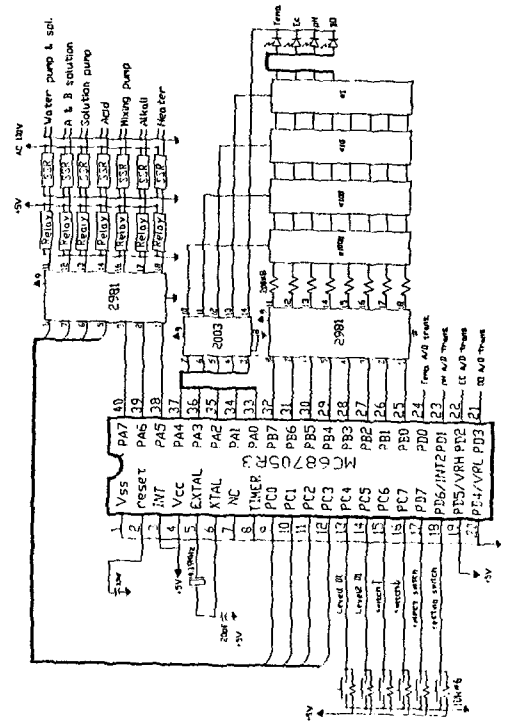


Fig. 3. Circuit diagram of the nutrient solution controller unit.

개발된 양액조제 콘트롤러는 전면에 4개의 7 세그먼트 LED를 부착하여 양액 상태를 표시할 수 있도록 하였으며, 키입력부는 출력부의 출력 항목을 선택하기 위한 선택키, 설정값 변경 모드 전환을 위한 설정키, 그리고 설정값 변경을 위한 증가, 감소 키 등 4개의 키로 구성하였다. 또한 현재 출력되는 항목을 지시하는 4개의 LED를 부착하였다.

콘트롤러의 내부에 각 구동기를 동작시키기 위한 SSR(solid state relay) 보드를 설치하였으며, 역방향의 전류로부터 메인 보드를 보호하기 위하여 릴레이를 이용하여 SSR이 구동되도록 하였다. 그림 3 에 그 회로도를 나타내었다.

4. 結果 및 考察

양액 조제 시스템의 성능을 검증하기 위하여 각 제어 대상별로 제어 시험을 수행하였다. 자료의 저장을 위하여 286 AT 컴퓨터를 이용하였으며, 양액 자동 조제 소프트웨어로서 성능 시험을 수행하였다. 각 신호발신기로부터의 신호를 A/D 변환 카드를 이용하여 입력되도록 하였다.

가. 양액 온도 제어

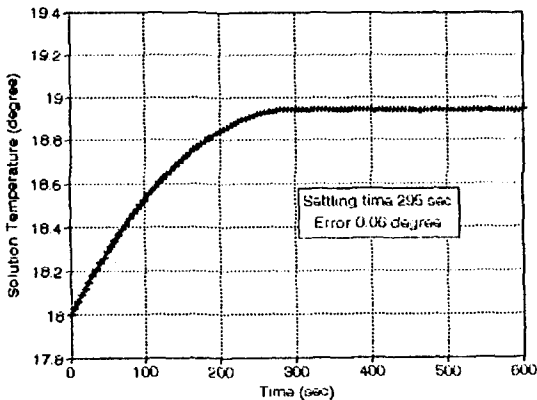


Fig. 4. Unit-step responses of the temperature control system(from 18 to 19°C).

그림 4는 양액 온도 제어 성능을 검증하기 위하여 18°C의 양액을 1°C 상승시키는 계단 응답시

험의 결과를 나타낸 것이다. 정정시간과 제어오차는 각각 4분 55초, 0.06°C로 나타났다.

나. 양액 농도(EC) 제어

그림 5는 양액농도 제어시스템의 계단응답 시험 결과를 나타낸 것이다. 시험에 사용된 농축배양액은 농촌진흥청 원예시험장 토마토용 추천액의 500배 농축액을 사용하였으며, 물의 공급원은 상수원으로 사용되는 수돗물을 사용하여 조제하였다. 농도 설정값이 1.3mS/cm일 때, 정정시간은 4분 13초, 제어오차는 0.03 mS/cm로 나타났다.

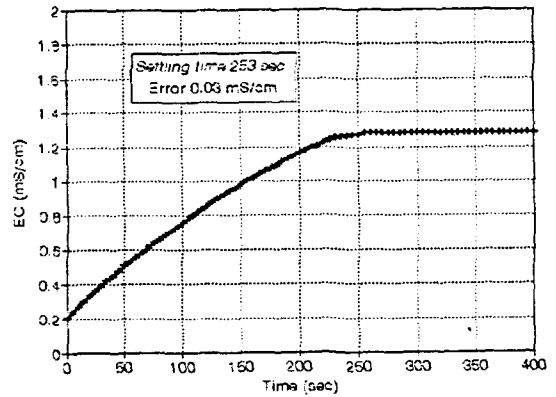


Fig. 5. Unit-step responses of the EC control system(from 0.2 to 1.3 mS/cm).

다. 양액 산도(pH) 제어

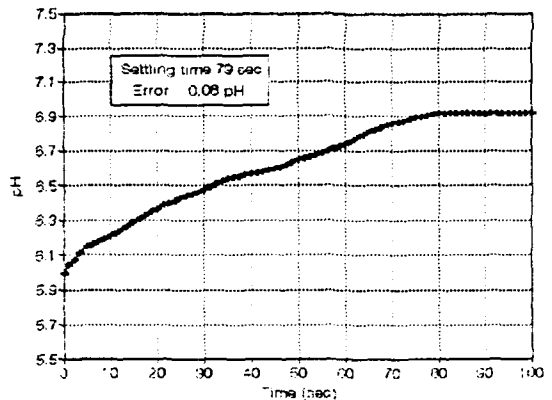


Fig. 6. Unit-step responses of the of pH control system(from 6.0 pH to 6.9 pH).

양액조제 장치의 산도 제어 성능 시험에서는 사용된 산, 알칼리 용액으로서 각각 황산(H_2SO_4), 수산화 나트륨($NaOH$) 0.1M 농도 용액을 사용하였다.

그림 6은 산도 제어시 계단응답시험 결과를 나타낸 것이다. 정정시간은 1분 19초, 제어 오차는 0.08 pH로 나타났다.

라. 양액 용존산소량(DO)

그림 7은 양액 온도 18°C에서 혼합 펌프를 작동시킬 때, 양액 내의 용존산소량의 변화를 나타낸 것이다. 용존산소량이 증가하여 18°C에서의 포화용존산소량에 도달하는데에 약 4 분이 소요되었다.

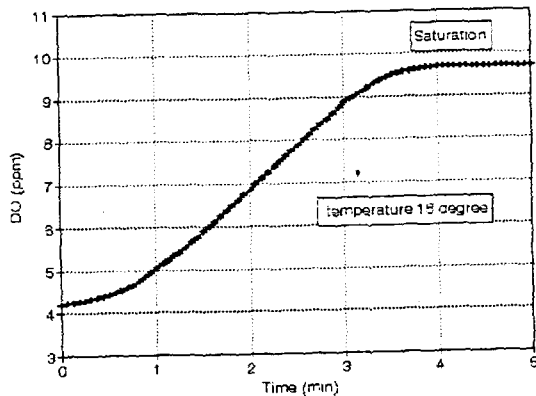


Fig. 7. Unit-step responses of the DO control system(from 4.2 to 9.7 ppm).

5. 要約 및 結論

본 연구는 인공배지용 양액 자동조제 장치의

개발을 목적으로 수행되었으며 그 결과는 다음과 같다.

양액의 온도, 산도, 농도(전기전도도), 용존산소량을 계측, 제어할 수 있는 장치를 구성하고, 정확한 양액의 조제와 취급의 용이성을 고려하여 원칩 마이크로 컴퓨터를 이용한 양액 조제 전용 콘트롤러를 제작하였으며, 양액 조제용 소프트웨어를 개발하였다.

개발된 양액 조제장치의 성능시험을 실시한 결과, 양액의 온도, 농도, 산도는 각각 $\pm 0.2^\circ C$, $\pm 0.2mS/cm$, $\pm 0.1pH$ 의 오차 범위 내에서 제어되었다.

6. 參考文獻

1. 송현갑 외. 1993. 시설원에 자동화, 문운당.
2. 오길근. 1995. 양액 자동 조제 장치 및 공급량 예측 프로그램의 개발, 서울대학교 석사 학위 논문.
3. 편집부. 센서의 원리와 사용법. 1988. 도서출판 세화.
4. 홍순호. 1990. 작물생산 자동화를 위한 복합 환경계측 시스템의 개발, 서울대학교 석사 학위논문
5. 橋本 康. 1997. 植物環境制御入門. オーム社
6. Shim, Kyu Don. 1992. Development of a fully-controlled plant growth system. M.S. thesis. Seoul National University.