

# 완전제어형 실험용 작물생육장치의 개발(II)<sup>+</sup>

-복합 환경제어 시스템-

## Development of a Fully-Controlled Plant Growth System(II)

-An Integrated Control System-

심 규 돈\*      류 관 회\*      노 상 하\*      홍 순 호\*  
K. D. Shim      K. H. Ryu      S. H. Noh      S. H. Hong

### Summary

This study was carried out to develop a fully-controlled plant growth system for studying the effects of environmental factors on plant growth. The plant growth system consists of the growth chamber, the measurement system for sensing and signal conditioning the environmental factors and the control system which includes control algorithm required for optimum operation and on-line monitoring.

The results of the study on the performance of the controlled plant growth system are summarized as follows :

1. Under the light intensity of 18,000~20,000 lux, the temperature was controlled in the range of  $22 \pm 0.4^\circ\text{C}$ , the relative humidity of  $70 \pm 5\%$  respectively.
2. The  $\text{CO}_2$  concentration was controlled in the range of  $1,000 \pm 40$  ppm(from 1st to 4th day) and  $1,500 \pm 40$  ppm(from 4th to 9th day).
3. The electric conductivity(EC) and pH of the nutrient solution were controlled in the range of  $1.9 \pm 0.2$  mS/cm and  $6.8 \pm 0.5$ pH respectively.
4. Under the above environmental conditions, the average fresh weight of leaf lettuce increased from 10g to 74g in 9 days with 24 hour lighting.

### 1. 서론

작물 생육환경의 자동제어에 관한 연구는 생장반응과 환경조건과의 관계를 정량화시킴으로써 생육을 위한 최적 환경조건을 구명하고, 이러한 재배조건을 효과적으로 구현하려는 의도에서 수행되어 왔다. Takakura 등(1974)은 PDP-8/E

컴퓨터를 이용한 조명 및 온습도 환경의 직접 디지털 제어(DDC)를 시도하였고, Parsons 등(1980)은 환경조건에 따른 생장반응 시험을 위한 데이터 수집장치를 개발한 바 있다. Prince 등(1981)은 인공 양액재배 장치를 제작하여  $\text{CO}_2$  농도, pH, 양액성분에 대한 적절한 제어를 수행한 결과, 수확량이 현저히 증가함을 실증하였다.

+ 이 연구는 한국과학재단의 1991년도 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

\* 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과

또한 Mitchell(1986)은 작물생육 환경제어에 관한 수년간의 연구를 종합하여 SYM-1 싱글보드 컴퓨터를 이용한 growth cabinet의 온도 제어장치를 완성하여 하드웨어 비용을 대폭 절감시켰고, Timmons와 Gates(1987)에 의해 상대습도 제어의 알고리즘이 개발됨으로써 실용화의 가능성이 높아지게 되었다.

농업여건이 우리나라와 비슷한 일본에서는 1980년대 중반 이후, 이른바 “식물공장”에 대한 연구가 활발히 진행되어 Hashimoto 등(1980)은 작물의 생육환경에 대한 컴퓨터 제어의 실용적인 연구를 수행하였고, Ikeda 등(1987)은 실험용 식물공장에서 엽채류 작물에 대한 온도, 빛, CO<sub>2</sub> 농도를 제어한 결과, 일반적인 자연환경에 비해 약 6배에 해당하는 생산촉진 효과를 얻었으며, 과정에서 수확까지의 시간을 1/4로 단축시켰음을 보고한 바 있으며, Hitachi, Mitsubishi, Yanmar 등 일본 굴지의 기업에서는 완전제어형 식물공장의 본격적인 상품화를 준비하고 있다.

이 분야에 대한 국내의 연구는 1980년대 후반부터 시작되었는데, 홍(1990)은 완전제어형 작물생산 시스템의 개발을 위해 온도, 습도를 비롯한 7개 환경요소의 온라인 계측장치를 개발한 바 있고, 서 등(1990)은 8-비트 컴퓨터를 이용한 온도환경의 ON/OFF 제어를 시도하였으며, 이 등(1990)은 배양액 자동관리 시스템을 개발하였다. 또한 이(1991)는 자동조정 기법을 이용하여 작물생육장치(Phytotron) 내부의 온·습도

제어를 위한 하드웨어 및 소프트웨어를 개발한 바 있다.

본 연구는 기술집약적 원예시설에서의 생육환경 자동제어기술을 확립하기 위한 기초 단계로, 작물 생육에 영향을 미치는 빛, 온도, 습도, 탄산가스 농도, 양액조건 등 각종 환경요인의 계측과 제어를 위한 검출기와 종단 작동 장치, 그리고 마이크로 컴퓨터를 이용한 계측 제어 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어를 구성하고, 작물 재배 실험을 통하여 개발된 시스템의 효과를 검증함으로써 작물생산의 자동화를 위한 복합 환경제어 시스템의 기본 설계방향을 제시하려는 목적으로 수행되었다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 계측 시스템의 구성

본 연구에서는 먼저 제어의 대상이 되는 환경요소로 照度, 온도, 습도, 이산화탄소 등 지상부 환경과, 뿌리를 통한 무기물 흡수에 관련된 酸度(pH), 溶存酸素量(DO), 電氣傳導度(EC) 등 지하부 환경을 선정하여 각각의 환경요소가 자동으로 제어될 수 있도록 마이크로컴퓨터를 이용한 실시간 연속 계측 시스템을 구성하였다.

#### 1) 계측장치의 선정

선정된 각종 환경요소를 계측하기 위한 계측장치는 측정 소요시간과 자동화의 용이성, 정확도 등을 고려하여 표 1과 같이 선정하였다.

Table 1. Specification of sensors for measuring the environmental factors

측정기기	Make and Model	Q' nty	Range
TEMPERATURE DETECTOR	RTD(Pt-100)	4EA	0~100℃
PH METER	TAKEMURA DM-21	1EA	pH 1~13
EC METER	TAKEMURA CM-53	1EA	0~20mS/cm
CO <sub>2</sub> ANALYZER	HORIBA GH-250E	1EA	0~300ppm
ILLUMINATION METER	TOKYO OPTICAL CO., LTD TOPCON IM-2D	1EA	0~19990lux
ANEMOMETER	DWYER INSTRUMENTS, INC. 470-1	1EA	0~600 ft/min 500~6000 ft/min

## 2) 신호처리 장치

본 연구에서 사용한 상용 계측장치의 출력신호를 자료수집장치에 입력시키기 위하여 개별 계측장치와 컴퓨터 입.출력장치 사이에 신호처리 장치를 두어 증폭, 선형화, 혹은 여과과정을 거치도록 구성하였다.

전기전도도(EC) 측정기에서 출력된 신호는 그림 1에 나타낸 것과 같이 계측용 선형증폭기(AD521)를 이용하여 증폭한 후, 작물생육에 필요한 측정범위 내에서 충분한 분해능을 나타낼 수 있도록 가감산 회로를 부가하였다.

한편, 탄산가스 계측기에서 출력되는 신호는 4~20mA의 표준 전류신호이므로 250Ω저항을 연결하여 1~5V의 전압신호로 변환하였다.

## 3) 데이터 수집장치

신호처리 장치에서 출력되는 아날로그 신호를 마이크로컴퓨터에 입력될 수 있는 디지털 신호로 바꾸기 위하여 16 채널의 멀티플렉서를 내장한 2중 적분형 A/D 변환기 카드를 이용하였고, 제어에 필요한 신호의 출력을 위하여 64비트의 디지털 입출력 카드를 이용하였다.

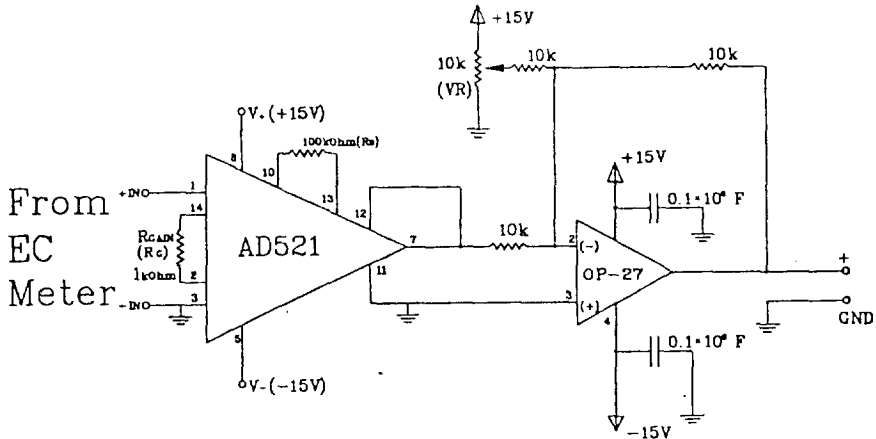


Fig. 1 Circuit diagram for EC signal conditioning.

## 나. 환경제어시스템 구성

선정된 제어인자들은 제어의 용이성과 환경요인간의 관련성을 고려하여 광원장치, 공기조화장치, 탄산가스 제어 장치, 양액관리 장치로 구분하여 각 부분의 종말 작동장치와 제어용 전기유니트를 표 2와 같이 구성하였다.

### 1) 광원 장치부

개발된 인공생육 시스템의 광원 장치부는 2개의 메탈-할로젠 램프와 6개의 주광색 형광등으

로 구성하여 과장에 대한 복사에너지 분포를 광합성 작용 스펙트럼과 광수용체 합성 스펙트럼에 적합하도록 하였으며, 광원의 뒷면에는 백색 반사판을 부착하여 광강도를 높이고 그 분포가 일정하도록 제작하였으며, 작물 생육위치에서의 조도는 약 18,000-20,000 lux가 되도록 하였다. 한편, 램프 점등시에 발생하는 열을 제거하기 위하여 광원 장치부와 생육장치 사이에 2중유리로 칸막이를 설치하고 광원 장치부 후면에 방열판을 부착하여 강제적인 換氣를 유도하였다.

Table 2. Specifications of electric components.

Components		Make and Specifications	Q' nty
제어장치부	전자식 개폐기	현대전자 HOR 1K	2EA
	반도체 릴레이	Jel system Co. JAS-225	2EA
	릴레이	한국릴레이 HR 707	6EA
광원장치부	메탈할로겐 램프	삼립 MH250(B)	2EA
	형광등	통일 FL-40D 220V 40W	6EA
공기조화부	히터	220V, 1kW(전열선)	1EA
	냉동기	Tecumseh Co. 220V, 1PS	1EA
	송풍팬	Centaur CT 3B52 220V 16W	3EA
	초음파 가습기	금성 GH-601UA 110V	1EA
CO <sub>2</sub> 제어부	레귤레이터	Nisshin EH-1N 110V	1EA
	가스 용기	NY04832, 10.31	1EA
	solenoid valve	진영 Electric 220V	1EA
양액관리부	순환펌프	금성 PF-064B 110/220V	1EA
	폭기 펌프	진우산업 돌핀디럭스 110V, 30W	1EA
	배양액 펌프	풍성 12V	5EA
	solenoid valve	진영 Electric 220V	1EA

## 2) 공기조화 장치부

제작된 작물생육 시스템의 공기조화 장치부는 전원이 공급되는 순간부터 송풍팬에 의해 연속적인 기류의 순환이 이루어지도록 설계하여 냉각기와 가열기를 통과하는 기류가 가열, 냉각 또는 제습과정을 거칠 수 있도록 하였다.

습공기의 제습은 공기의 유로상에 냉각기를 설치하여 공기가 이곳을 통과할 때 습공기를 노점온도 이하로 냉각시키는 방법을 사용하였는데, 이때 냉각기는 제습과 동시에 불필요한 냉각과정도 수행하게 되므로 이러한 현상을 방지하기 위하여 냉각기 하단에 가열기를 설치하여 재가열과정을 거치게 하였다.

한편, 완전제어형 작물 생육장치의 내부는 밀폐형이므로 외기에 의한 수분 유입이 없기 때문에 생육장치 하단에 초음파 가습기를 설치하여 상대습도의 증가를 가능하게 하였다. 이 방식의 가습장치는 저온에서도 가습이 가능하며,水滴의 크기가 매우 작고 균일하며, 가습과정으로 인

한 온도 변화가 거의 없기 때문에 제어의 목적에 잘 부합되었다.

제작된 작물 생육장치 내부의 건구온도는 순환팬 입구와 반대편 벽면에 설치하여 그 평균을 취하였고, 습도 측정을 습구온도 센서, 양액의 액온 측정을 위한 온도 센서 등 4개의 Pt-100 센서는 신호처리 회로부를 거쳐 컴퓨터에 인터페이스 시켰다.

## 3) 탄산가스 제어 장치부

탄산가스 계측기의 시료 공기 채취부에는 여과기를 부착하여 검출 셀의 오염을 방지하였고, 측정에 사용된 공기를 생육장치 내부로 회수시키는 형태로 유로를 구성함으로써 측정으로 인하여 CO<sub>2</sub> 환경이 변화되지 않도록 하였다.

탄산가스 농도의 제어는 계측된 농도와 설정 농도간의 차이에 비례하여 솔레노이드 밸브의 개방시간을 변화시키는 방식을 취하였다. 이때 용기에 저장된 액화 탄산가스는 공급시 기화잠열에 의한 실내의 온도 저하를 방지하기 위해 가

열형 레귤레이터를 통해 1.2 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력을 유지하면서 작물 생육장치에 공급되는데, 이때 단위 시간당 공급되는 CO<sub>2</sub>의 양은 유량계가 부착된 유량 조절 밸브에 의하여 5ℓ/min가 되도록 설정하였다. 그림 2에 탄산가스 제어 장치부의 구성도를 나타내었다.

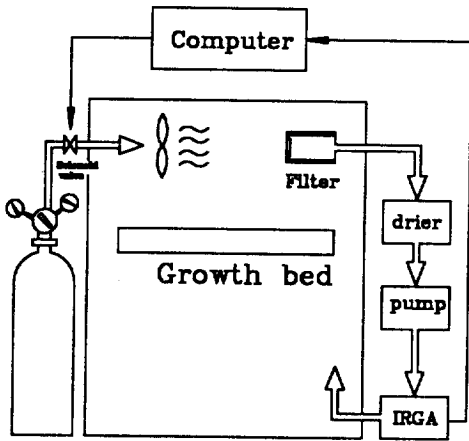


Fig. 2 Schematic diagram of CO<sub>2</sub> concentration control

#### 4) 양액 제어 시스템

본 연구에서 제작한 작물생육 시스템에서는 성장효과의 극대화화 및 제어의 편의성을 위하여 담액 수경재배 방식을 채택하였다. 이때 양액은 Steiner 배양액을 사용하였는데, 조제된 양액의 농도(EC)는 약 2mS/cm, pH는 6.5로 측정되었다.

재배 베드에 담긴 양액은 작물의 흡수와 수분 증산에 따라 그 농도 및 pH가 변화하게 된다. 따라서 본 연구에서는 부족한 양분의 보충을 위하여 100배로 농축된 농후양액을 침전이 발생하지 않는 조건으로 분리하여 A, B로 나누어 설치하였고, 별도의 물 보충 라인을 설치하여 희석이 가능하도록 구성하였다. pH의 조절을 위하여 산 용액과 알칼리 용액을 별도의 용기에 담아 설치하였고, 설정치와 측정치의 차이에 따라 농후 배

양액이나 산, 또는 알칼리 용액을 소형 미터링 펌프에 의해 비례적으로 공급하는 방법으로 양액 제어를 수행하였다.

한편, 뿌리의 호흡과 흡수 능력에 영향을 미치는 용존산소량은 과다로 인한 장애가 없는 것으로 알려져 있기 때문에 별도의 계측 및 제어장치를 부착하지 않은 채, 공기 펌프에 의한 산소 강제 혼입법을 채택하여 항상 양액이 포화 용존 산소 상태에 있도록 하였다. 그림 3은 제작된 양액 제어 시스템의 구성도이다.

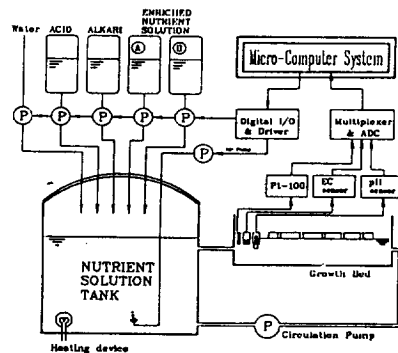


Fig. 3 Schematic diagram of the nutrient-solution control system

#### 5) 복합 환경제어 시스템의 구성

작물의 생육은 여러가지 환경요인의 상호작용에 의하여 영향을 받게 되므로, 본 연구에서는 하나의 마이크로컴퓨터에 의하여 각각의 제어장치를 통합하여 제어할 수 있도록 그림 4와 같은 시스템을 구성하였다.

마이크로컴퓨터와 여기에 연결된 디지털 출력 장치에 의하여 각각의 종단 작동부를 제어하기 위해서는 별도의 제어 및 구동 시퀀스가 구성되어야 한다. 그림 5와 그림 6은 개발된 전기 시퀀스 회로의 제어부와 구동부를 나타낸 것인데, 이 장치는 220V를 기준전압으로 하여 각 장치를 수동으로 조작하거나, 또는 컴퓨터를 이용하여 자동적으로 제어할 수 있도록 구성한 것이다.

이때 컴퓨터와 디지털 출력장치에서 발생하는

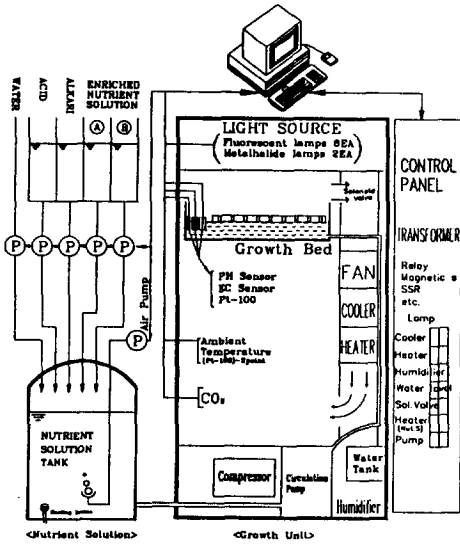


Fig. 4 Schematic diagram of fully-controlled plant growth system

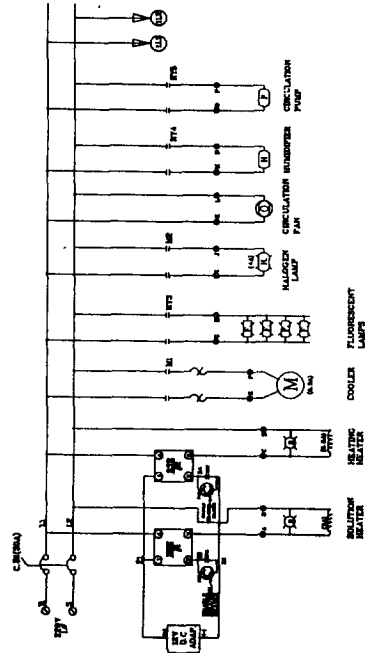


Fig. 6 Relay-ladder diagram(driving unit)

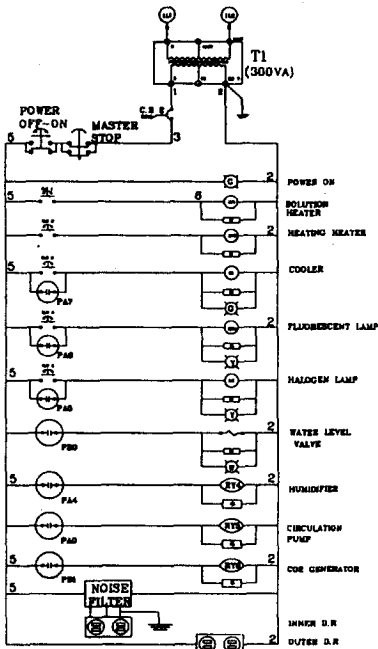


Fig. 5 Relay-ladder diagram(control unit)

제어신호는 매우 미약한 신호이므로 직접 전기 시퀀스 회로를 구동할 수 없기 때문에, 다알링톤(Darlington) 형태로 접속된 트랜지스터 집적소자(UDN2981)를 사용하여 전력을 증폭하였고, 전력 단속에 의한 제어장치의 오동작을 방지하기 위하여 트랜지스터의 출력단과 릴레이의 사이에 포토커플러(PC817)를 부착하여 전기적인 격리를 실시하였다.

#### 다. 제어 알고리즘

##### 1) 온·습도 제어

제어변수로 설정한 생육장치 내부의 건구온도와 상대습도의 제어를 위해 가열기, 냉동기, 가습기 등 각종 공조기기를 적절히 제어함으로써 원하는 생육환경을 구현하였다. 온도의 경우, PWM 방식에 의하여 가열용 히터를 제어하였고, 냉각은 마그네틱 콘택터를 전환함으로써 on-off

제어를 수행하였다. 상대습도의 제어를 위해서는 공조 프로세스를 몇가지 과정으로 구분한 후, 냉동기와 가열기, 가습기를 적절히 조합하여 구동시켰다.

한편, 생육 장치의 크기, 단열 정도, 작물 생육 상태에 무관하게 항상 적정 제어 상수를 스스로 찾아갈 수 있도록 자동조정(auto-tuning) 알고리즘을 응용하여 제어 소프트웨어를 작성하였다.

## 2) 복합 환경 제어

작물 생육환경에 대한 복합적인 제어를 위하여 온·습도 공조 시스템을 포함한 광주기, 탄산가스 농도 등 지상부 환경과 지하부의 양액 상태에 대한 제어 알고리즘을 개발하였다. 그림 7은 본 연구에서 제작된 인공생육 장치의 복합환경제어 시스템과 윈도우 환경의 전체적인 흐름도를 나타낸 것이다.

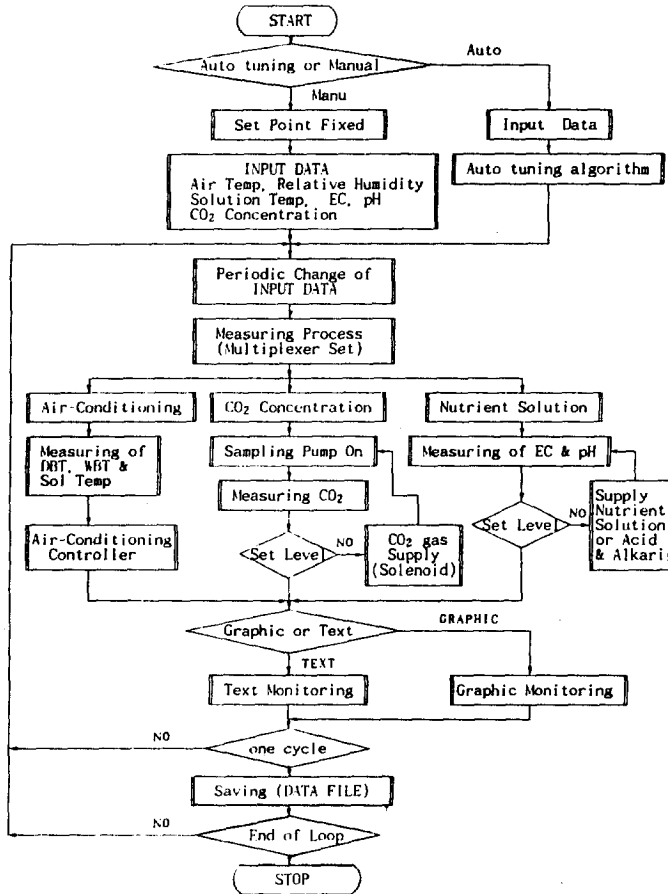


Fig. 7 Flow chart of environmental control program

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 환경제어시스템의 성능

제작한 작물 생육장치 내부의 모든 램프가 점등된 경우, 재배 베드 상부에서의 최고 광강도는 20,000lux로 측정되었고, 평균 광강도는 19,000 lux로 나타났으며, 가시광선 영역에서 광원의 스펙트럼 분포는 태양광과 유사한 것으로 나타났다.

그림 8은 개발된 장치에서 설정온도를 변화시켰을 경우 생육장치의 제어 성능을 나타낸 것이며, 그림 9는 생육장치 내부의 온습도를 변화시키면서 제어할 경우의 제어 성능을 나타낸 것이다. 이것은 설정치를 일정한 시간 간격으로 변화시킬 때 제어 시스템이 설정치의 변화에 순응하는 정도를 검증한 것으로, 초기에 설정온도와 상대습도를 각각 24℃, 60% RH에서 20분 경과 후에 설정치를 각각 26℃, 80% RH로 변화시키고, 20분 경과 후에는 24℃, 60% RH로, 다시 20분 후에는 26℃, 80% RH로 변화시키는 순환식 제어를 수행한 경우이다. 이 그림에서 설정치가 26℃, 80%로 변하고 5분 정도 경과한 후에 정상상태로 도달하였다가, 다시 설정치를 24℃, 60%로 변화시킨 후에도 5분 정도 경과하면 정상상태로 도달됨을 알 수 있다. 이 과정을 통하여 예상치 않은 외란의 영향이나 실험 도중에 생육장치의 문을 10분 정도 개방한 후에 다시 닫는 경우와 같이, 생육장치 내의 환경이 갑자기 변화하여도

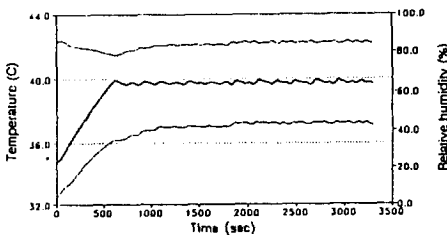


Fig. 8 Effect of change in reference temperature on control performance

일정한 시간이 경과하면 다시 원래의 제어 상태로 복귀함을 확인하였다.

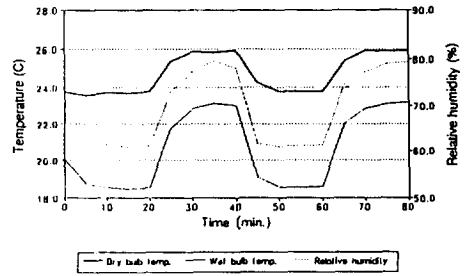


Fig. 9 Control performance change with respect to reference step inputs

탄산가스 농도의 제어는 설정치와 측정치의 차이에 따라 밸브의 개폐 횟수를 증가시키는 비례 ON/OFF 제어 방식을 이용하였는데, 이때 CO<sub>2</sub>의 과잉 공급시 탄산 가스의 제거는 사실상 불가능하므로 초과 공급이 되지 않도록 회로 이득을 낮게 설정하였으며, 적정 공급 주기의 설정에 따라 작물 생육에 지장이 없는 범위 내에서 보다 정밀한 제어가 가능하도록 소프트웨어를 작성하였다.

그림 10은 생육장치 내부에 작물을 재배하는 임의의 시기에서 측정된 탄산가스 농도의 변화와 그 제어성능을 검증한 것이다. 이 그림에서 1500ppm의 목표치를 설정했을 때 제어의 오차 범위는 ±40ppm 이내임을 알 수 있다.

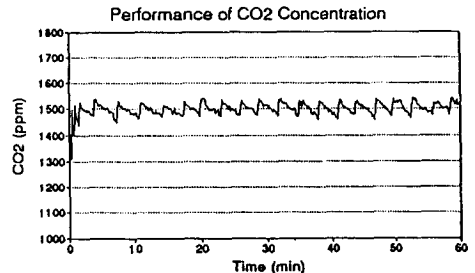


Fig. 10 Performance of CO<sub>2</sub> concentration control



양액의 상태를 나타내는 지표로 양액 농도는 전기전도도(EC)를 채택하였고, 배양액의 pH는 유리 전극법으로 측정하였다. 양액농도 및 pH의 조절을 위해 농후 양액과 산·알칼리 용액을 소형 미터링 펌프로 보충하거나 증류수를 투입하는 방법으로 제어하여, 양액 농도(EC)는 1.9 mS/cm에서  $\pm 0.2$  mS/cm, pH는 6.8에서  $\pm 0.5$ 의 범위의 제어 정도를 얻었다.

나. 작물 재배실험 결과

완전제어형 작물생육 시스템의 실제 제어성능을 확인하기 위하여 엽채류 작물(상추)의 재배 실험을 수행하였다.

재배실험을 수행하는 동안 각종 환경요인은 일정한 목표치에 고정시켰는데, 온도 22°C, 습도 70% RH, 빛의 조도 20,000lux, CO<sub>2</sub> 농도 1000 ppm(정식 후 4일간) 및 1500ppm(4일부터 9일까지), 양액 농도 1.9 mS/cm(EC), pH 6.8로 설정하고, 용존산소량은 포화 용존산소 상태로 하였다.

실험기간 전체에 걸쳐 온도는  $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 의 제어 정도를 나타내었다. 상대습도의 경우, 생육초기에는  $\pm 5\%$ 로 작물을 재배하지 않은 상태에서의 제어성능과 동일하였으나, 생육후기에는  $\pm 8\%$  정도로 제어의 정도가 다소 감소하였는데 이는 작물의 생장이 증가하면서 증산량도 증가되기 때문으로 판단된다. 한편, 탄산가스의 농도와

EC, pH의 제어성능은 작물을 재배하지 않고 제어성능을 검증할 때와 동일한 결과를 보임으로써, 작물 생육기간 중에도 양호한 제어성능이 나타남을 알 수 있었다.

생육장치 내부에서 생육된 상추는 10g의 유묘를 정식한 후, 10일 만에 74g으로 성장하였다. 그림 11은 생육 일수에 따른 상추의 생중량(g/plant) 변화를 나타낸 것으로, 완전 제어형 작물생육 시스템을 이용한 경우(실선)와 일반적인 온실 재배조건인 경우(점선)를 비교할 때, 약 5배의 생육 촉진 효과가 확인되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 작물의 생육에 필요한 주요 환경요인의 제어를 위한 검출기와 종단 작동 장치 및 마이크로컴퓨터를 이용한 환경 제어시스템을 개발하여 그 성능을 검증하고, 기초적인 작물생육 실험을 통하여 재배 중의 제어성능 및 적용 효과를 분석하려는 목적에서 수행되었다. 이를 위하여 인공 광원에 의한 작물생육용 챔버를 제작하고, 빛, 온습도, 탄산가스 농도, 양액조건 등 제한 환경요인을 측정 제어할 수 있는 작물의 인공생육 시스템을 개발하였다. 완성된 장치에서 공시작물인 상추를 재배하면서 시스템의 제어성능을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 개발된 시스템의 온도제어 오차는 0.4°C 이하, 습구온도계, 냉각기, 초음파 가습기 등을 이용한 습도제어 오차는 5% RH 이하의 제어정도를 나타내었다.

2. 탄산가스 농도의 제어는 적정 공급 주기의 설정에 따라 작물 생육에 지장이 없는 범위 내에서 보다 정밀한 제어가 가능하도록 비례 ON/OFF 제어 방식을 이용하였는데, 정상상태에서 1500ppm의 목표치를 설정했을 때, 40ppm의 오차 범위 이내에서 제어가 가능하였다.

3. 배양액의 조건은 양액 농도의 간접적 지표로 전기전도도(EC)를 채택하였고, pH는 유리 전극법으로 측정하였다. 양액농도 및 pH의 조절을 위해 농후 양액과 산·알칼리 용액을 소형

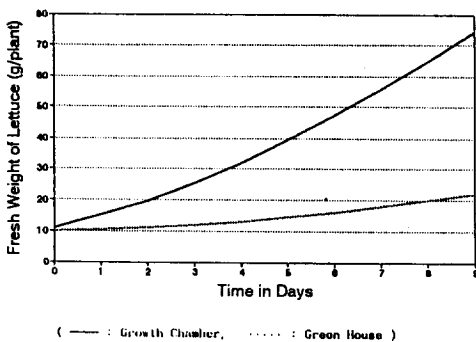


Fig. 11 The growth of lettuce for 9 days

미터링 펌프로 보충하거나 증류수를 투입하는 방법을 이용하였으며, 이때 양액 농도(EC)는 1.9mS/cm에서  $\pm 0.2$ mS/cm, pH는 6.8에서  $\pm 0.5$ 의 범위에서 양호한 제어성능을 보였다.

4. 개발된 작물 생육장치를 이용한 상추의 재배실험 결과, 일반적인 온실재배에 비하여 약 5배에 달하는 생육촉진 효과를 확인할 수 있었으며, 10g의 상추 묘를 정식한 후, 10일 만에 74g의 상추가 수확되었다.

### 참 고 문 헌

1. Takakura, T., T. Kozai, K. Tachibana and K.A. Jordan. 1974. Direct digital control of plant growth. Design and operation of the system. Trans. of the ASAE 16 : 1150-1154
2. Downs, R.J. and Hellmers, H. 1975. Environmental and the Experimental Control of Plant Growth. pp 31-82. Academic Press. London.
3. Dunlap, J.L., J.M. McKinion, J.E. Parsons, C. J. Phene, J.R. Lambert and D.N. Baker. 1978. Microprocessor-based data acquisition and control hardware for the SPAR system. ASAE Paper No.78-5544. ASAE. St. Joseph. MI 49085.
4. Parsons, J.E., J.L. Dunlap, J.M. McKinion, C.J. Phence and D.N. Baker. 1980. Microcomputer-Based Data Acquisition and Control Software for Plant Growth Chamber (SPAR) Trans. of ASAE 23(3). pp 589-595.
5. Hashimoto, Y. 1980. Computer control of short-term plant growth by monitoring leaf temperature. Acta Horticulturae. 106. p 139.
6. Prince, R.P., J.W. Bartok and D.W. Protheore. 1981. Lettuce Production in a Controlled Environmental Plant growth Unit. Trans. of ASAE 24. pp 725-730.
7. Campbell, D. E., B. T. O'Connor. 1982. A Versatile Plant Growth System with Wide Range Environmental Control. Trans. of ASAE pp 237-241.
8. Jones, P., J. W. Jones, T. H. Allen, Jr., and J. W. Mishoe. 1984. Dynamic computer control of closed environmental plant growth chambers. Design and verification. Trans. of the ASAE 27(3) : 879-888
9. Bailey, W. Mitchell. 1986. Intergrated microcomputer-based control system for multiple environmental cabinets. Agri-Mations 2.
10. Ikeda, A., S. Nakayama, Y. Kitaya and K. Yabuki, 1987. Effects of Photo-period, CO<sub>2</sub> Concentration, and Light Intensity on Growth and Net Photosynthetic Rates of Lettuce and Turnip. Acta Horticulturae. No 229 : pp 273-282.
11. 吉在 豊樹. 1976. 電算機를 利用した植物成長の最適化制御. 農業氣象 32(1). pp 41-49.
12. 高倉 植. 1977. 栽培工場のシステム制御. 計測と制御 14(6). pp 14 -15.
13. 이기명, 박규식. 1986. 시설원예에 있어서 재배관리의 자동화 시스템에 관한 연구(1) - 물 관리 자동화. 한국농업기계학회지 11(1). pp 31-36.
14. 홍순호. 1990. 작물생산 자동화를 위한 복합 환경계측 시스템 개발. 서울대학교 석사학위논문.
15. 서원명, 민영봉, 윤용철. 1990. Microcomputer를 이용한 Greenhouse의 온도제어 System 개발에 관한 연구. 한국농업기계학회지 15(2). pp 134-142.
16. 이기명 등. 1990. 수경재배의 양액관리 시스템 개발. 한국농업기계학회지 15(4). pp 328-338.
17. 이규철. 1991. 실험용 작물생육장치의 온·습도 제어 시스템 개발. 서울대학교 석사학위논문.