

完全制御型 實驗用 作物生育裝置의 開發(I)⁺

— 溫 · 濕度 制御 시스템 —

Development of a Fully-Controlled Phytotrons

— Temperature and Humidity Control System —

李 奎 哲* 柳 寬 熙* 盧 祥 夏* 洪 淳 昊*
K. C. Lee, K. H. Ryu, S. H. Noh, S. H. Hong

Summary

The aim of this study was to develop a phytotron for studying the effects of environmental factors such as temperature and humidity on plant growth. This equipment consists of the growth chamber, and the measurement and control system including control algorithms required for optimum operation. As the first step of the study, a temperature and humidity control system was developed. The results of this study are summarized as follows ;

1. Pt-100 was selected to measure temperature and a linearized op-amp circuit was developed for signal conditioning.
2. Pt-100 wet bulb thermometer based on Asmann's principle was developed to measure relative humidity.
3. Temperature and relative humidity conditions were controlled by ON-OFF and PWM operation using a PID controller. And an autotuning algorithm using the characteristics of step response was developed to determine optimal PID constants which were independent of the size of apparatus and environmental factors.
4. Under the ambient temperature of 20°C~25°C, the temperature was kept within the error of $\pm 0.3^\circ\text{C}$ in the range of 10°C~40°C, and the relative humidity was kept within the error of $\pm 5\%$ in the range of $\pm 50\% \sim 90\%$

+ 이 연구는 한국과학재단의 1990년도 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

* 서울대학교 農業生命科學大學 農科大學 農工學科

1. 緒 論

農耕 社會로 부터 工業化된 社會로의 변천에 따른 농업의 상대적인 退步는 農業 勞動力의 減少, 老齡化, 農地 專用 등으로 농업 전반에 심각한 문제를 대두시켰을 뿐만 아니라, 금후에는 農產物의 需給에 적지 않은 혼란이 예상된다. 따라서 앞으로는 土地 生産力의 向上과 播種에서 收穫까지의 最適 生育 環境을 組成하는 高精度 栽培 管理 作業方法이 개발되어 최소의 費用과 노력으로 최대의 利益을 가져오는 방향으로 발전해 나가야 할 것이다.

作物 生長은 作物 내부의 반응과 大氣 요소와의 相互 作用에 따라 결정되는데, 作物 反應은 모든 生長 과정에 일정한 것이 아니므로 대부분의 公업 생산보다 복잡한 과정을 거치게 된다. 低費用에 의한 高品質 農產物의 생산에는 작은 空間 内部에 作物을 높은 密度로 배치하고, 作物의 生長에 영향을 미치는 環境 요소인 빛, 溫度, 濕度, 炭酸가스 濃度, 養液 등을 적절히 제어함으로써 作物 生長을 인위적으로 調節하는 자동 재배 시스템의 도입이 절실하다. 이와같이 자동화된 生育 시스템에서는 인위적인 環境 制御에 의해 작물을 재배하기 때문에 품질 향상을 기대할 수 있으며, 病蟲害 防止, 環境 汚染 被害를 豫防함은 물론, 점차 소비자에게 脚光을 받고 있는 無公害 作物을 생산하여 부가가치를 높일 수 있다는 장점이 있다. 한편, 인위적 제어 방법에 의한 作物生育의 最適環境 設定의 方法論에 있어서 최근에 마이크로 프로세서의 출현과 기술의 발전 등으로 低費用, 高精密度의 실현이 용이해졌다.

作物 生育의 최적 生育 環境을 究明하기 위한 연구는 最適의 生長을 실현하는 環境條件을 究明하여, 재배 프로세스를 그 조건으로 規格化하여 最適栽培를 언제든지 어디에서나 누구든지 再現시키는 것을 목적으로 하드웨어와 소프트웨어 분야에서 오래전부터 진행되어 왔다. Takakura(1974) 등은 최적화된 식물 생장 정보를 얻기 위해 컴퓨터를 이용한 직접 디지털 제어장치(DDC)와 제어 알고리즘을 개발하여, 植物生長

과 상호 연관된 環境조건 사이의 관계를 연구하는 방법을 제시하였으며, Jones(1984) 등은 마이크로컴퓨터를 이용하여 植物生育裝置의 環境인자들을 제어하기 위한 시스템의 설계와 개발의 理論的, 實際的 基礎를 제공했다. Mitchell(1985)은 低價格의 SYM-1 싱글보드 컴퓨터를 사용하여 家禽傳染病 연구를 위한 6개의 캐비닛 내의 乾.濕球溫度, 熱交換器의 冷·溫水 溫度 등을 제어하고 모니터(monitor)하는 시스템을 개발하였다. 한편, 국내에서도 작물재배환경을 인공적으로 제어하려는 연구를 위하여 홍(1989)은 人工光源에 의한 完全制御型 作物生産 시스템의 基礎研究로서, 식물의 生長反應에 대한 基礎理論을 토대로 作物의 光合成과 物質代謝에 영향을 미치는 光, 온도, 습도, CO₂농도 등 기본 環境 요소와, 무기물 흡수에 관련된 酸度(pH), 溶存 酸素量(DO), 電氣傳導度(EC) 등 養液條件을 마이크로 컴퓨터에 의해 온라인으로 처리할 수 있는 複合環境計測시스템을 개발하였으며, 서(1990) 등은 8 bit 컴퓨터를 이용한 ON/OFF 제어에 의해 그린하우스의 溫度環境제어시스템을 개발하였다.

본 研究는 作物의 生産을 自動化하기 위한 基礎段階로서 作物의 生長에 대한 溫度 및 濕度 관계의 究明을 위한 基礎實驗裝置의 개발을 위하여 溫·濕度 制御에 필요한 空氣調和裝置를 設計하고 實驗用 作物生育裝置의 효율적 운용을 위한 制御 알고리즘을 개발하여 마이크로컴퓨터를 이용한 溫度와 相對濕度의 計測 및 制御 시스템을 構成하고, 마이크로 컴퓨터와의 인터페이스(interface)를 통한 溫·濕度 制御 裝置를 製作하여, 이 시스템의 動作 特性을 檢證하기 위하여 수행되었다.

2. 材料 및 方法

가. 作物生育裝置의 製作

作物生長 環境에 대한 自動制御시스템에는, 온도조절기(thermostat) 등을 이용한 on-off 제어장치로부터, 作物生長에 영향을 미치는 빛, 온도, 습도, 탄산가스 농도, 양액 등의 다양한 環境

요소를 컴퓨터 등에 의해 복합적으로 제어하는 시스템에 이르기까지 많은 종류가 있다.

본 연구에서는 人工光 이용 방식의 完全制御型 作物生育시스템 개발을 위한 기초단계로 生育裝置의 온·습도 제어장치를 개발하였으며, 제어기기로는 마이크로컴퓨터를 사용하였다. 이 장치의 設計時 고려한 사항은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- ① 제어의 精密度 및 安定性的의 향상
 - ② 設定點(set point)의 固定 및 任意 變化의 용이성
 - ③ 制御變數(乾球溫度, 濕度 등)의 감지 방법 및 모니터링
 - ④ 制御시스템의 信賴性和 操作 容易性的의 향상
- 이에 따라 본 연구에서 설계·제작한 作物生育裝置는 다음과 같은 성능에 목표를 두고 연구되었다.

- ① 제어의 精密度와 장치의 내구성을 고려하여 건구온도와 상대습도는 각각 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, $\pm 5\%$ 범위에서 제어가 가능하게 한다.
- ② 작물의 종류에 따라 設定值를 固定시키거나 自動的으로 變化할 수 있게 한다.

- ③ 作物栽培 實驗중에 生育裝置의 문을 열고 닫는 등의 外亂에 대한 시스템의 補償應答을 빠르게 한다.
- ④ 환경조건이나 제어상태의 遠隔 모니터링이 가능하게 한다.
- ⑤ 溫·濕度 제어를 위해 冷却器, 加熱器와 加濕器를 複合制御할 수 있어야 한다.
- ⑥ 사용자가 보다 편하게 操作, 制御 할 수 있도록 모니터링상에 윈도우 環境을 具現한다.

1) 光源 裝置部

광원장치부는 메탈-할로겐 램프 (삼립전기 MH250(B)) 2개, 주광색 형광등 (통일전기 FL-40D) 6개, 메탈-할로겐 램프용 트랜스 등으로 구성함으로써 파장에 대한 복사에너지 분포를 자연광에 접근시켰으며, 生育裝置의 반대편에는 백색 반사판을 부착하여 光強度를 높이고, 그 분포가 일정하도록 제작하였다. 또한, 램프 점등시에 발생하는 熱이 生育裝置 내부에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 광원 장치부와 生育裝置 사이에 2중유리로 칸막이를 설치하고 광원 장치부 後面에 加熱팬을 부착하여 強制換氣를 시켰다.

2) 空氣調和 裝置部

作物生育裝置의 온·습도 제어는 空氣調和 (air conditioning) 裝置 또는 空調裝置를 조절하여 生育장치 내의 온도와 상대습도를 제어하여 사용 목적에 적합한 공기 상태를 유지함으로써 행하게 된다.

生育裝置의 온·습도 제어용 하드웨어 및 소프트웨어의 檢證을 위하여 본 연구에서 제작한 生育裝置의 개략도는 그림 1과 같다. 여기에서 生育장치 내의 氣流는 生育장치에 전원을 供給하는 순간부터 送風팬에 의해 連續的으로 循環되도록 하였는데, 이 氣流는 냉각기와 가열기를 통과하면서 加熱, 再熱, 冷却 또는 除濕過程을 거치게 된다.

濕空氣의 除濕을 위하여 공기의 流路上에 冷却器를 설치하여 공기가 이곳을 통과할 때 濕空氣를 露點溫度 이하로 냉각시켜 除濕이 되게 하

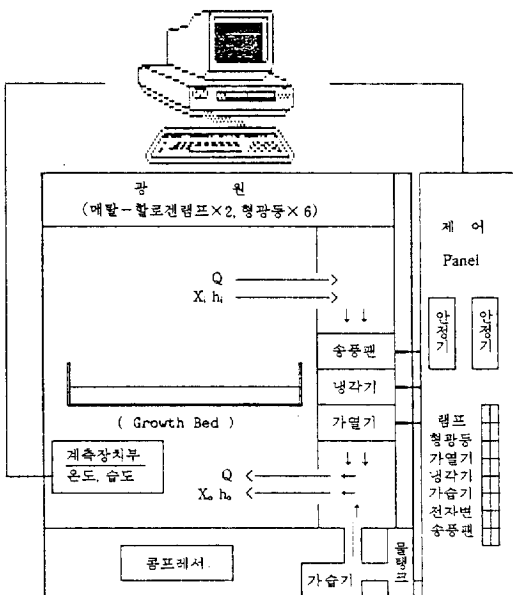


Fig. 1. Schematic diagram of phytotron.

였다. 이 冷却器는 제습과정과 동시에 불필요한 냉각과정도 수행하는데, 이러한 현상을 방지하기 위하여 冷却器 下段에 加熱器를 설치하여 再加熱過程을 거치도록 하였다.

또한, 生育裝置의 내부는 완전 밀폐형이므로 外氣에 의해서 流入되는 습기가 존재할 수 없기 때문에 상대습도의 인위적인 증가를 위하여 生育裝置 하단에 超音波 加濕器를 설치하였다. 이 초음파 가습기는 低溫에서도 加濕이 가능하며, 水滴의 크기가 다른 가습장치에 비하여 매우 작고 균일하며, 습기에 의한 온도 변화가 거의 없기 때문에 제어가 용이한 장점이 있다.

그림 1에 표시한 바와 같이 斷熱된 生育조 내에 공기를 순환시키면서 加熱器로부터 열량 q (kcal/h), 加濕器에서 수분 M (kg/h)을 가했을 때, 공기의 유량을 Q (kg/h), 空調室 입구의 엔탈피, 절대습도를 각각 h_i (kcal/kg), x_i (kg/kg), 출구의 엔탈피 및 절대습도를 각각 h_o (kcal/kg), x_o (kg/kg)라 하고 수분의 엔탈피를 h_L (kcal/kg)이라 하면, 가열과정에서 q 와 M 은 각각 취득감열, 취득수분량이 되고, 냉각과정에서는 각각 感熱과 潛熱을 합한 除去熱량과 凝縮에 의해 제거되는 수분의 양이 된다.

生育裝置內的 熱平衡을 고려하면, 生育조 내에 流入된 열과 排出된 열은 동일하므로 평형상태에서는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$Qh_i + q + Mh_L = Qh_o \dots\dots\dots (1)$$

수분에 대한 物質平衡을 고려하면,

$$Q(h_o - h_i) = q + Mh_L \dots\dots\dots (2)$$

$$Q(x_o - x_i) = M \dots\dots\dots (3)$$

이상의 식을 이용하여 生育裝置에 부착된 加熱器, 冷却器의 空氣調和裝置 容量을 선정하였다.

生育裝置 내의 공기를 순환시키기 위하여 사용된 送風팬에 의해 空調裝置의 出口에서 배출되는 공기의 유속은 熱線風速計로 측정된 결과, 1.1m/s이며, 出口의 면적 0.064m²을 곱하면, 공기의 유량은 4.2m³/min이다.

生育裝置는 완전 단열되며, 밀폐되어 外氣에 의한 영향은 없다고 가정하면, 光源에 의한 영향이 상대적으로 작을때, 生育裝置 내의 室內感熱

負荷(room sensible heat) q_{cs} 는, 식(2)에 의해서 다음과 같이 표시된다.

$$q_{cs} = Q(h_o - h_i) - Mh_L$$

$$Mh_L \ll Q(h_o - h_i) \text{이므로}$$

$$\begin{aligned} q_{cs} &\approx 1.2\text{kg/m}^3 \times 4.2\text{m}^3/\text{min} \times 0.24\text{kcal/kg}^\circ\text{C} \\ &\quad \times (T_2 - T_1)^\circ\text{C} \\ &= 1.2\text{kcal/min} \\ &= 0.084 \text{ kW} \end{aligned}$$

일반적으로 冷却器의 효율은 15% 정도이므로, 냉동효율을 고려하여 1PS 용량의 冷却器를 선정하여 설치하였다. 또한, 加熱器의 용량도 동일한 수식으로 선정하였는데, 加熱器는 샘플링 및 연산처리와 조작신호의 출력 등에 의해 실제 가동시간을 샘플링 시간의 최대 40%로 고정시켰으며 PWM제어에 의하여 최대 용량의 20% 정도로 가동된다고 보아 그 용량이 1kW가 되도록 제작하였다.

3) 部屬裝置 制御部

生育裝置의 溫·濕度 제어를 위하여 장치내에 설치된 부속장치를 동작시키는 제어 유닛은 220V의 전압을 기준전압으로 하여 인공광원으로 生育조 내부에 설치되어 있는 메탈-할로젠램프 2개, 형광등 6개와 공기순환팬 3개, 가열기, 냉각기, 초음파 가습기 등 온·습도 제어기기를 수동조작하거나, 또는 컴퓨터를 이용하여 자동제어 할 수 있도록 구성하였다. 수동조작은 각 기기마다 부착시킨 로터리 스위치를 전환시킴으로서 가능하게 하였고, 이때 함께 부착된 과일롯 램프의 점등상태로 스위칭 동작을 확인하도록 제작하였다.

110V 강압 트랜스 이후에 연결되는 마그네틱 콘택터 (할로젠 램프, 냉각기 제어용) 2개, 릴레이 (형광등, 가열기, 초음파 가습기 제어용) 3개, 솔레노이드 (초음파 가습기 물탱크의 액위 제어) 1개 등은 수동 또는 자동조작에 의해 기준 전원을 단속시키기 위해 사용되었다. 한편, 가열기의 PWM (pulse width modulation) 제어를 위하여 SSR (solid state relay) 素子を 부착시켰다.

나. 溫·濕度 計測 시스템의 構成

1) 乾·濕球 溫度 計測 回路部

본 연구에서는 습도를 표시하는 여러가지 指標중에서 식물의 증산과 광합성에 직접적인 영향을 미치는 상대습도를 습도 제어의 대상으로 하였는데, 건·습구 온도로부터 상대습도를 산출하는 방법으로는 ASAE D271.2 Psychrometric data에서 제안된 수식을 이용하였다.

건·습구 온도의 측정을 위하여 실용화되어 있는 온도 검출소자중에서 온도 변화에 따른 전기저항치 변화가 민감하고, 安定性 및 再現性이 우수하고, 耐久性이 매우 높은 白金 測溫抵抗體 (Resistance Temperature Detector)를 채택하였다. 이 저항체는 0°C에서의 저항치가 100Ω이므로 Pt-100 이라고도 한다.

습구온도의 계측은 감온부를 5m/s 이상의 통풍이 있는 送風팬의 하부에 설치하여 Pt-100을 이용한 아스만 통풍식 濕度計를 제작하여 수행하였다.

본 연구에서 건·습구 온도의 계측을 위하여 제작한 신호처리 회로는 測溫抵抗體와 고정저항기를 이용한 브리지 회로를 구성하여 測溫抵抗體의 온도 변화에 따른 저항값의 변화를 측정하고, 온도에 따른 Pt-100 검출소자의 비직선성을 線形化回路器 (linearizer)에 의해 직선화 시킴으로써 측정의 精度를 향상시켰다. 한편, 測溫抵抗體 소자의 한쪽 전극에 2개, 다른 한쪽 전극에 1개의 도선을 접속하는 3선배선방식을 채택하여 도선저항의 영향을 최소화하였고, 측정된 온도 신호는 4~20mA 표준 전류 전송 방식에 의해 외부기기에 연결되도록 설계하였다.

2) 資料收集 裝置部

마이크로컴퓨터를 이용하여 生育裝置의 환경을 제어하기 위한 1차적인 단계로 測溫抵抗體로 계측한 온도 및 습도 관련 신호를 A/D 변환기 등의 資料收集 裝置를 통해 컴퓨터가 인식할 수 있는 데이터로 입력시키기 위하여 4~20mA의 신호로 변환된 乾·濕球溫度에 해당하는 전기

신호는 250Ω저항기의 양단에서 1~5V 사이의 전압 형태로 변환되어 데이터 수집용 인터페이스 카드의 A/D변환부에 입력된다. 이때 A/D 변환부에 입력된 아날로그 신호는 디지털 신호로 변환되어 컴퓨터의 중앙처리장치로 전송되어 연산을 행하게 된다.

본 연구에서는 溫·濕度 計測用 資料收集 裝置로 국내의 제우스컴퓨터社에서 제작된 MCP-520 DATA ACQUISITION CARD를 사용하였다. 이 카드는, 8채널의 멀티플렉서 (multiplexer)가 내장되어 있고, 分解能은 12비트이며, 變換速度는 15μsec이다.

한편, 이 장치에는 8255 PPI를 이용한 3개의 디지털 입·출력 포트가 내장되어 있다. 본 연구에서는 이 포트의 디지털 출력을 이용하여 마이크로 릴레이와 대용량 반도체 스위치 (SSR)를 구동시켰다.

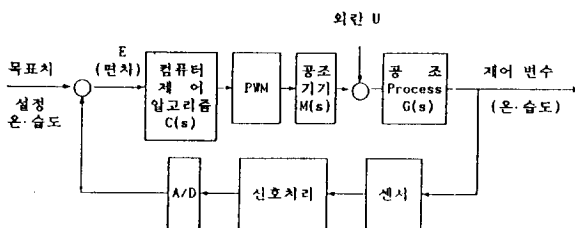
다. 溫·濕度 制御 시스템의 構成

1) 하드웨어

作物生育裝置의 광원, 온도, 상대습도 등의 계측 및 제어를 위하여 구성된 온라인 모니터링 시스템의 中央處理裝置(CPU)는 IBM-AT 마이크로 컴퓨터를 채택하였다. 이 컴퓨터의 中央處理裝置에는 640 kByte의 RAM과 360 kByte의 확장 메모리가 내장되어 있으며, 보조기억장치로 플로피디스크 드라이버와 20 MByte 용량의 하드디스크 드라이버를 부착하였다. 한편, 설정치와 메뉴선택 및 제어 알고리즘의 수행을 위한 입·출력 장치로는 IBM-AT용 표준 키보드, 모노크롬 모니터와 도트-매트릭스 (dot-matrix) 프린터를 부착하였다.

그림 2는 生育裝置 온·습도 제어시스템을 블록다이어그램으로 표시한 것이다. 測溫抵抗體에 의해 측정된 온·습도에 대한 물리량은 信號處理 회로와 A/D 변환기를 거쳐 中央處理裝置에 입력되어 演算處理가 행해지며, DIO 포트에 제어신호가 출력되어, 空調機器를 동작시킴으로써 원하는 동작이 수행된다. 이 제어신호는 수 mA

의 작은 전류신호이므로 직접 空調機器를 제어하기 곤란하므로, 트랜지스터 8개로 구성된 UDN2981을 사용하여 제어신호를 증폭시킨 후, 포토커플러(PC817)를 사용하여 릴레이를 구동시킴으로써 입·출력 신호를 전기적으로 격리시켰다.



C(s) : PID Controller

M(s) : 空調機器(가열기, 냉각 및 제습기, 가습기)의 傳達函數

G(s) : 濕空氣線圖의 熱力學的 원리에 기초한 制御對象의 空調 process 傳達函數

Fig. 2. Block diagram of control system for phytotron.

2) PID 制御器

가) PID 制御 알고리즘

본 연구에서는 加熱器 제어용 알고리즘으로 PID 제어를 채택하였는데, 이 방법은 비례제어, 미분제어, 적분제어의 특성을 모두 보유하고 있기 때문에 制御器에 비례제어만 사용하는 경우에 발생할 수 있는 오프셋(offset)을 제거시킬 수 있을 뿐만 아니라, 제어 과정에서 外亂이 들어오는 경우, 偏差를 빠른 속도로 제거시킴으로써 應答성이 매우 우수하다는 특징을 갖고 있다.

信號處理 과정을 거쳐 PID 制御器로 입력되는 온도 계측신호는 설정치 r(t)와 측정치 c(t)와의 차 즉, 편차 e(t)로 표시될 수 있으며, 조절계의

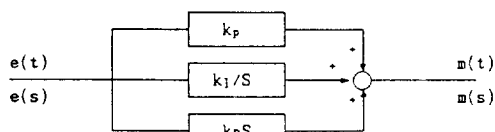


Fig. 3. Block diagram of PID controller (Laplace transform).

출력을 m(t)로 할 경우의 입출력 관계는 아래의 블록선도에 나타낸 것과 같다.

이때 K_iS와 K_dS를 Z-transform하여 정리하면, 그림 4와 같이 표현할 수 있다.

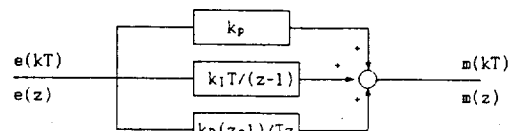


Fig. 4. Block diagram of PID controller (Z-transform).

여기에서 PID 制御器의 입력을 e(t), 출력을 m(t)로 하면 입출력 관계는 다음 식과 같이 나타난다.

$$m(t) = K_p \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (4)$$

종래의 아날로그식 PID 制御器의 경우에는 식(4)를 공기나 油壓, 또는 微分·積分回路, 演算器 등을 이용한 전기회로 등의 아날로그적 연산에 의해 제어를 수행하였으나, 본 연구에서는 디지털 프로그램에 의한 제어를 하기 위하여 식(4)를 입력 e(t)의 샘플값에 의한 식으로 변환시켜 적분과 미분에 대해 다음과 같은 근사식으로 치환하였다.

$$\int e(t) dt = T_s \sum_{i=0}^k e(i) \quad (5)$$

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{1}{T_s} \{e(k) - e(k-1)\} \quad (6)$$

식(5)와 식(6)을 사용하면 식(4)에 대응하는 디지털 제어 변환식을 다음 식과 같이 근사할 수 있다.

$$m(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_d}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (7)$$

단, m(k) 및 e(k)는 t = kT_s 時刻에서의 m(t) 및 e(t)의 값을 의미하며, 식(7)을 이용하여 m(k) - m(k-1)을 계산하여 정리하면 다음과 같다.

$$m(k) = m(k-1) + \alpha e(k) + \beta e(k-1) + \gamma e(k-2) \quad (8)$$

여기에서, $\alpha = K_p(1 + T_s/T_1 + T_D/T_s)$

$$\beta = -K_p(1 + 2T_D/T_s)$$

$$\gamma = K_p T_D/T_s$$

현재의 제어량 $m(k)$ 는 $m(k-1)$, $e(k-1)$, $e(k-2)$ 를 메모리에 보존하는 알고리즘으로 계산할 수 있다.

나) 자동조정 (Autotuning) 알고리즘

PID 制御器를 사용하여 對象 시스템에 대한 제어를 수행할 때, 적합한 제어 應答特性을 얻는 것은 PID 常數를 변화시킴으로서 가능하게 되는데, 구성된 제어장치의 動的特性은 PID 制御器에서 階段應答法을 사용하여 실험적으로 구해지는 PID 常數 (K_p , T_i , T_D)에 의해서 표현될 수 있다.

본 연구에서는 階段應答法의 원리를 이용하여 생육장치의 最適 PID 常數를 자동적으로 구할 수 있는 알고리즘을 개발하여, 제작된 생육장치에 적용시켰다. 이 방법은, 생육장치에서 평가 가능한 요인과 평가 불가능한 요인들의 복합적인 영향으로 제어성능이 변화하므로 autoregressive한 모델化로 각 요인들을 평가하여 원하는 출력을 얻도록 하는 適應制御 技法의 기초적인 자동조정 (Autotuning) 알고리즘으로, 생육장치의 크기, 단열정도, 작물 생육 상태에 무관하게 제어장치의 動的 特性을 고려한 最適의 PID 常數가 구해지도록 하는 것이다.

PID 制御器의 출력 $m(k)$ 을 操作端에서 제거하고 생육장치의 제어기기를 가동시키면 시간 변화에 대한 온도 應答曲線이 구해지고, 이 결과에 따라 浪費時間(L)과 應答傾斜(R)가 컴퓨터에 의해 계산되므로써 대상 생육장치에 있어서 제어장치의 動的 特性을 고려한 最適의 PID 常數가 구해지게 된다.

표 1에 자동조정 (Autotuning) 알고리즘을 실행하여 구해진 浪費時間과 應答傾斜로 階段應答法에 의해 最適의 PID 常數를 구하는 산출식을 나타내었다.

Table 1. Values of optimal PID constants with respect to step response.

MODE \ constant	K_p	T_i	T_D
P	1/RL	∞	0
PI	0.9/RL	3.3L	0
PID	1.2RL	2L	0.5L

3) 溫·濕度 複合制御 알고리즘

본 연구에서 제어변수로 설정한 건구온도와 상대습도의 제어는 생육장치에 부착된 각종 空調機器를 적절하게 조절하므로써 수행되었다. 이때 상대습도는 공기중에 포함되어 있는 수증기의 絶對量을 나타내는 것이 아니고, 그때의 온도조건에 따른 함수이므로 불필요한 제어 동작을 최소화하기 위하여 각각의 프로세스를 몇가지 기본 과정으로 구분하였다.

온·습도 제어에 필요한 空調 프로세스는 가열과정, 냉각과정, 가습과정, 제습과정, 가열 가습과정, 가열 제습과정, 냉각 가습과정, 냉각 제습과정 등으로 세분화될 수 있다. 가열과정은 건구온도가 설정치보다 작아지면 加熱器로 공기를 가열시켜 온도를 상승시키는 과정이다. 이 과정에서는 설정온도와 계측 온도간의 偏差를 PID 制御器에 입력시켜 계산된 제어 출력에 따라 加熱器의 PWM제어를 수행하였다.

냉각과정은 건구온도가 설정치보다 높아진 경우, 마그네틱 콘택터(magnetic contactor)를 스위칭하여 冷却器를 가동시킴으로써 공기를 냉각시키는 과정이다. 이와 비슷한 방법에 의해 제습 과정도 수행되는데, 濕空氣가 除濕되면서 불필요하게 냉각되는 것을 방지하기 위하여 冷却器 하단에 설치한 加熱器로 再熱시키는 과정을 첨가하였다. 공기를 再熱하면 제어성능이 증가된다는 것은 예비실험을 통하여 확인되었으며, 가습과정은 상대습도가 설정치보다 낮아질 때, 초음파 가습기와 연결된 릴레이를 동작시켜 수행하였다.

또한, 온·습도의 複合制御를 수행하기 위해서는 加熱器, 冷却器, 加濕器를 복합적으로 동작시키는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 온·습

도 계측치와 설정치 사이의 偏差 신호를 이용하여 複合制御를 수행하였다.

3. 結果 및 考察

가. 計測 시스템의 性能

1) 乾球溫度 計測裝置

제작한 溫度 信號處理 回路의 검증은 표준시험조건에서 그림 5와 같은 장치를 구성하여 수행하였다. 이 性能試驗 장치는 디지털 밀티미터 (Fluke 8560A), 표준 저항기상자 (Genrad 1433) 등으로 구성되었다.

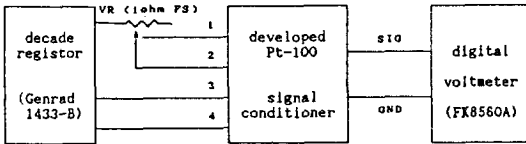


Fig. 5. Schematic diagram for performance test of Pt-100 temperature conditioner.

시험은 JIS C 1604-1981에서 제정한 測溫抵抗體 저항치표를 참조하여 0°C에서 50°C까지 5°C 씩 증가하면서 Pt-100의 溫度에 해당하는 저항치를 표준 저항기상자와 可變抵抗器로 만들어서 각 3회씩 인가하여 이때 나타나는 출력전압 측정치의 평균을 비교하여 보았다. 이 시험에서 제작한 장치의 최대 非直線性 오차는 측정범위의 0.2%인 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이하로 나타났다.

또한, 安定性 시험을 위하여 Pt-100의 입력 단자에 0°C에서의 저항치에 해당하는 100.00 Ω 을 연결하고 10시간 동안의 출력변화를 측정된 결과, 제작된 信號處理 回路의 최대 영점 드리프트 (zero drift) 는 4mV로, 溫度로 환산하면 약 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 정도였다. 그리고 30°C에서 Pt-100의 저항값에 해당하는 111.88 Ω 을 입력시키고 10시간 동안 출력 변화를 측정된 결과, 이 장치의 스패 드리프트 (span drift)는 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 에 해당하는 4 mV로 나타났다.

2) 相對濕度 計測裝置

濕球溫度計의 원리를 이용해서 제작한 상대습도 計測裝置에 대한 검증은 표준시험조건에서 국가 교정 검사 기관 협의회에서 제정한 표준 교정절차 (KASTO-TE-51-89)를 참조하여 수행되었다.

습도계측장치의 正確度 검증을 위하여 기준기인 스위스의 Novasina사의 HUMIDAT-IC와 제작한 습도계측장치의 검출소자를 생육장치의 중심부에 설치한 후, 내부온도를 20°C로 고정하고, 상대습도를 20%에서 90%까지 약 10% 간격으로 설정하여 가동시키면서 기준기와 제작한 습도계측장치의 출력을 읽었다.

이 때 각각의 濕度條件에서 검출소자의 안정성을 위한 대기시간은 5분으로 하였으며, 기준기의 상대습도 표시장치와 제작한 습도계측장치에서 출력되는 신호를 컴퓨터 인터페이스를 통하여 모니터에 표시되는 값과 비교하였다. 이 결과, 제작된 습도 計測裝置의 최대 非直線性 오차는 $\pm 2\%$ 로 상대습도로 환산하면 약 $\pm 2.5\%$ RH로 나타났다.

나. 制御 시스템의 性能

개발된 자동조정 (Autotuning) 알고리즘을 이용하여 본 연구에서 제작된 생육장치의 動的 特性을 나타내는 PID 常數들을 구하여 표 2, 표 3과 그림 6에 나타내었다.

Table 2. PID constants measured by autotuning algorithm with sampling time of 6 sec.

PID constants	R	L	K _P	T _I	T _D
Operate heater only	0.0083	26	6	52	13
Disturbance effect by light	0.0128	12	8	24	6

Table 3. PID constants measured by autotuning algorithm with sampling time of 20 sec.

PID constants	R	L	K _P	T _I	T _D
Operate heater only	0.0123	24	5	48	12
Disturbance effect by light	0.0136	10	9	20	5

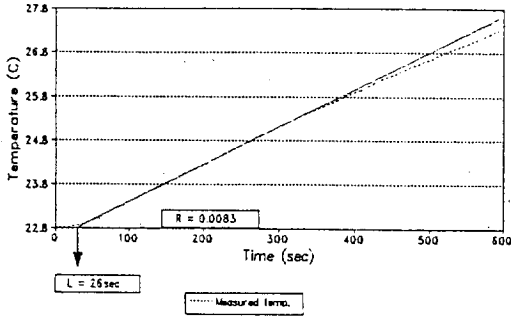


Fig. 6. Step response of heating apparatus.

표 2와 표 3에서 나타난 바와 같이 加熱器만 동작하였을 경우와 광원이 外亂으로 작용할 경우 간에 PID 常數들이 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

또한 표 3과 같이 샘플링 시간을 길게 설정하면 加熱器의 동작 시간이 증가하므로 應答傾斜는 증가하며, 浪費時間은 상대적으로 감소하므로

PID 常數들이 상이해지는 것으로 나타났다.

그림 6은 표 2의 경우에서 수행된 자동조정 알고리즘으로 구한 應答傾斜와 낭비시간을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 점선은 자동조정 알고리즘의 수행으로 시간에 따라 변화하는 생육조 내부의 온도곡선이며 가는실선은 알고리즘 수행으로 구해지는 應答傾斜曲線을 나타낸다.

실험을 통하여 본 연구에서 개발된 溫·濕度 제어 알고리즘을 사용하여 제작된 생육장치에의 제어를 수행할 경우, 생육장치 외기온도가 20~25°C 일 때, 설정치가 온도 10~40°C, 상대습도 50~90% RH일 경우에는 설정치의 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, $\pm 5\%$ RH 이내로 제어가 가능함을 확인할 수 있었으며, 생육장치의 외기온도가 설정온도보다 낮을수록 제어성능이 양호하였다.

그림 7에 본 연구에서 개발된 溫·濕度 제어 시스템을 이용한 作物生育裝置의 溫·濕度 제어 범위를 습공기선도에 표시하였다. 外氣溫度

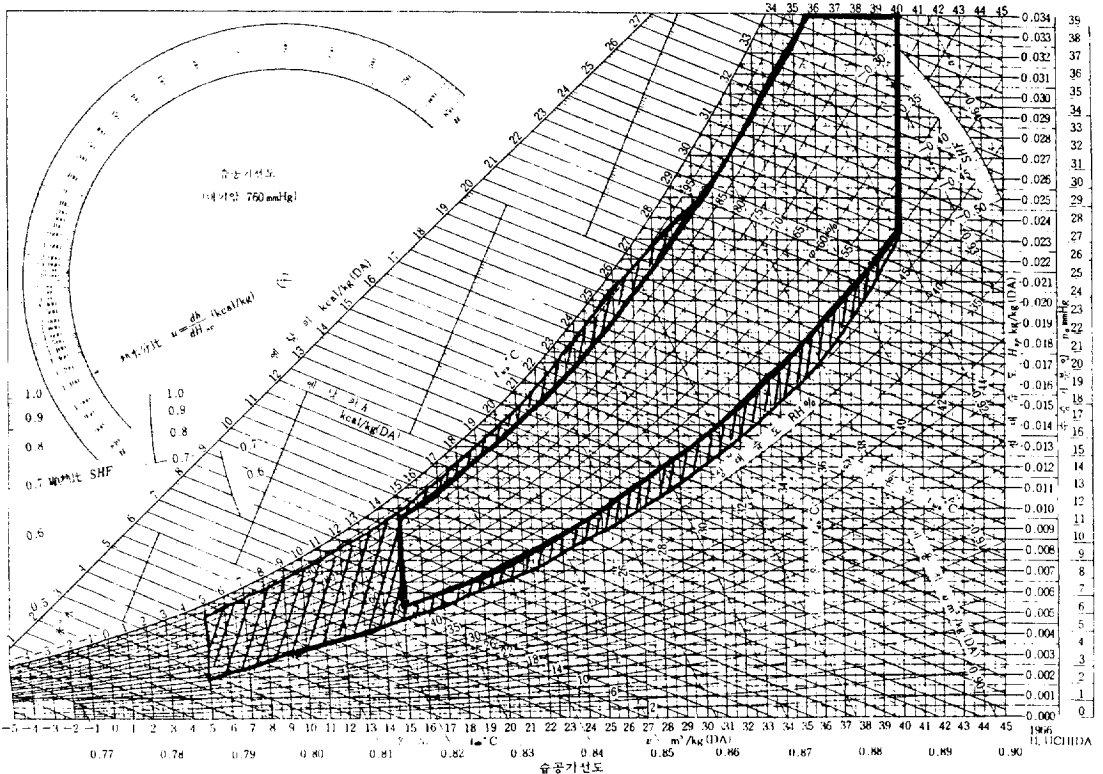


Fig. 7. Range of temperature and humidity to maintain specified control performance for phytotron.

20~25°C 에서, 굵은 실선 내의 범위는 設定値의 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, $\pm 5\%$ RH 이내로 제어가 가능한 부분을 표시하며, 設定値의 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 10\%$ RH 까지 제어가 가능한 영역은 가는 실선으로 빗금친 부분이다.

4. 要約 및 結論

본 연구는 작물의 생산을 자동화하기 위한 기초단계로 온·습도의 計測 및 制御 시스템을 구성하고, 시스템의 동작에 필요한 제어 알고리즘을 개발하여 작물의 최적생육과 온도 및 상대습도의 관계를 究明하는 기초실험장치를 개발하기 위하여 수행되었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 가. 온도의 計測을 위한 檢出素子로는 白金 測溫抵抗體를 선택하고, 檢出된 信號의 處理를 위해 아날로그 방식의 線形化 增幅回路를 제작하였으며, 이 장치의 檢證 결과, 測定誤差는 0~50°C 범위에서 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이하로 나타났다.
- 나. 상대습도의 計測을 위하여 아스만 通風式 濕球溫度計의 원리를 적용시킨 Pt-100 濕球溫度計를 제작하였다. 성능시험 결과, 20~90% RH의 범위에서 $\pm 2.5\%$ RH 이내의 正確度로 습도를 측정할 수 있음이 檢證되었다.
- 다. 溫·濕度 制御를 위해 ON-OFF 制御 방식과 PID 制御器의 알고리즘을 채택하였으며, 階段應答法의 원리를 이용하여 장치의 크기 및 외부환경요인에 무관하게 장치의 동적 특성을 고려한 최적의 PID 常數를 구할 수 있는 자동조정 (autotuning) 알고리즘을 개발하였다.
- 라. 개발된 실험용 작물생육장치를 사용하여 溫·濕度 制御를 수행할 경우, 生育裝置 外氣溫度가 20~25°C 일 때, 온도 10~40°C, 상대습도 50~90% RH 인 설정범위에서 오차 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, $\pm 5\%$ RH 이내의 正確度로 제어가 가능함을 확인하였다.

參 考 文 獻

1. Bailey, W. Mitchell. 1986. Intergrated microcomputer-based control system for multiple environmental cabinets. Agri-Mations 2.
2. 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
3. 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 System). Trans. of the ASAE 23(3). : 589-595.
4. Takakura, T., T. Kozai, K. Tachibana and K. A. Jordan. 1974. Direct digital control of plant growth. I. Design and operation of the system. Trans. of the ASAE 16 : 1150-1154
5. 橋本 康. 1987. 植物環境制御入門. 152pp. ohm社, 東京.
6. 渡部一郎. 1987. 農業環境實驗法. 285pp. 사이エソ스하우스, 東京.
7. 金孝經. 1988. 空氣調和. 556pp. 東明社, 서울.
8. 서 원명, 민 영봉, 윤 용철. 1990. Microcomputer를 이용한 Greenhouse의 溫度 制御 System 開發에 관한 研究. 한국농업기계학회지 15(2).pp 134-142.
9. 이병식. 1988. 마이컴 계측제어 활용법. 274 pp. 도서출판 세운, 서울.
10. 홍 순호. 1990. 작물 생산 자동화를 위한 복합환경계측 시스템 개발. 서울대학교 석사학위논문.