

온수난방시스템 온실의 온도제어 시뮬레이션¹⁾

민영봉* · 정태상¹ · 하종규²

*경상대학교 농업기계공학과 · ¹진주산업대학교 기계공학과

²농촌진흥청 원예연구소 시설재배과

A Simulation of Temperature Control of Greenhouse with Hot-Water Heating System

Min, Young-Bong* · Chung, Tae-Sang¹ · Ha, Jong-Kyu²

* Dept. of Agri. Machinery Engineering, College of Agriculture,
Gyeongsang National University, Chinju, 660-701, Korea

¹ Dept. of Machinery Engineering, Chinju National University,
Chinju, 660-758, Korea

² National Horticultural Research Institute, R.D.A., Suwon, 441-440, Korea

Abstract

It is required to analyze the controlled response of air temperature in greenhouse according to control techniques for precise control. In this study, a mathematical model was established for air heating of greenhouse with hot-water heating system. The parameters of the model were decided by regression analysis using reference data measured at the greenhouse being heated. In the simulation for the digital control of air temperature in the greenhouse, the mathematical model to evaluate the control performances was used. Tested control methods were ON-OFF control, P control, PI control and PID control. The mathematical model represented by inside air temperature (T_i), hot-water temperature (T_w) in heating pipe and outside air temperature (T_o) was expressed as a following discrete time equation :

$$T_i(k+1) = 0.851 \cdot T_i(k) + 0.055 \cdot T_w(k) + 0.094 \cdot T_o(k)$$

Control simulations for various control methods showed the settling time, the overshoot and the steady state error as follows; infinite time, 3.50°C, 3.50°C for ON-OFF control ; 30min, 2.37°C, 0.51°C for P control; 21min, 0.00°C, 0.23°C for PI control; 18min, 0.00°C, 0.23°C for PID control, respectively. PI and PID controls appeared to be optimal control methods. There was no effect of differential gain on the heating process but much effect of integral gain on it.

주제어 : 디지털 수식모형, P제어, PID제어

Key words : digital mathematical model, P control, PID control

* Corresponding author

¹⁾ 이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음

서 론

최근 우리 나라는 정부의 시설원에 기반 조성 지원에 따라 현대화 온실의 설치면적이 증가하고 있으며 대부분의 현대화 온실에는 경영 규모가 확대됨에 따라 생산비 절감을 도모하기 위하여 환경제어 및 재배관리 자동화 설비의 설치가 필수화되고 있다.

그러나 온실의 난방에는 많은 금액의 장치비와 운전경비가 들어가기 때문에 경비절감이 최대의 과제라 할 수 있다. 따라서 온실의 보온성의 향상, 장치비와 운전경비의 절감 및 경제적인 난방방식의 도입, 적정규모의 난방장치의 설치 및 최적제어가 필요하다.

일정규모 이상의 온실에는 온수보일러 난방시스템을 채용하는데, 이 시스템은 일정한 열량의 연소기로부터 보일러 본체에 있는 일정온도의 온수의 저장이 이루어지고, 이 온수를 온실내부에 설치된 방열관을 통해 유동시킴으로서 온실내부온도가 조절된다. 종래 이 시스템의 온도제어방법은 설정온도와 실내온도의 차에 의해 온수순환을 ON 또는 OFF시킴으로서 실시하였는데, 이 방법은 실내온도의 진동이 수반되므로 정밀한 제어결과를 얻기 어렵다(李, 1995).

이 문제점을 해결하기 위하여 보일러 온수의 저장조와 방열관 사이에 3방향밸브(3 way valve)를 설치하고 설정온도, 실내온도 및 외기온을 비교하여 3방향밸브를 조절하는 방법을 이용한다. 즉 온실내외의 온도에 따라 방열관 내의 순환수의 온도를

변화시키는 방법이다. 이 방법은 온수 보일러 온수저장조의 높은 온도를 직접 방열관 내로 유입시키는 것이 아니라 조건에 따라서 방열관내 순환수와 보일러 저장조 온수를 혼합 조절하여 적합한 온실내 순환수 온도를 결정하는 것으로 제어정밀성을 높이고 난방에너지를 절감할 수 있다.

온실의 온도제어 정밀성과 투입에너지의 절감을 위해서는 유연성이 높은 디지털제어가 보다 효과적이라는 연구결과를 발표한 예는 수없이 많지만, Young 등(1993)은 46편의 주요 관련문헌을 인용하여 이를 일목요연하게 정리하였다. 그 주요 내용은 과거의 온실환경 제어실태 소개, 온실의 환경제어에 필요한 디지털제어이론의 전개와 응용방법을 서술한 것으로, 1980년대를 전후한 온실의 온도제어는 실내온도의 최적설정점을 구하여 에너지의 절감을 도모하는 방향으로 시도되었고, 1980년대 중반이후 온실환경의 제어수식 모델정립과 추정기법에 의한 디지털제어를 적용하여 ON·OFF 제어보다 효과적인 제어결과를 얻을 수 있음을 논술했다. 특히 외란요소인 기후와 온실내의 경시적 환경변화에 대처하는 디지털 적응제어기법이 가장 유효함을 논술했었다. 그러나 온실의 온도환경모델은 1차지연모델이 예상되는데 다양한 추정모델을 적용함으로써 실용화하기에는 미흡한 점이 있었다. 국내에서도 ON·OFF제어(서 등, 1990)와 디지털제어에 의한 온실의 온도제어연구에서 ON·OFF제어보다 디지털제어가 온도제어오차를 0.4~0.6℃ 정도 줄일 수

있음을 보고하고 있으나, 온풍난방시스템을 대상으로 한 시뮬레이션(민 등, 1993; 李, 1995)과 온수의 순환속도를 조절하는 PI제어의 도입(김 등, 1998)에 의한 것으로 3방향밸브로 제어되는 온수난방시스템에 적용하기에는 부적합한 것으로 판단된다. 따라서 직접적인 디지털제어의 도입 이전에 3방향밸브로 제어되는 온수난방시스템 온실의 온도제어계 수식모델링과 제어시뮬레이션에 의한 디지털온도제어의 성능을 추정해 볼 필요가 있다.

본 연구는 3방향밸브로 제어되는 온수난방시스템 온실의 온도제어수식모형을 수립하고, 이 수식모형을 이용한 ON-OFF 제어, 비례(P)제어, 비례적분(PI)제어 및 비례적분미분(PID)제어기법을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 평가하여 최적의 제어기법을 도출하는 것이 목적이다.

시뮬레이션에 이용된 수식모형

1. 온수공급에 의한 실내온도 변화

온실의 최대난방부하 산정에는 일본시설원예협회(1994)에서 사용하는 방법이 있는데, 이 방법은 관류열부하, 틈새환기, 지표전열부하를 따로 산정하여 전체 난방부하를 복잡하게 산출하므로, 이용이 불편하며 계산과정도 복잡하다. 따라서 활용성을 높이기 위하여 온실의 틈새환기와 관류열부하는 총합열전달계수로 대체하고, 지표전열부하는 온실내부열용량(공기 + 내부시설물 + 작물 + 내부토양)에 포함시키면 태양열을 무시하거나 외관으로 취급할 경우는 다음과 같은 열수지식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_i = C \frac{dT_i}{dt} + hA_g(T_i - T_o) \dots \dots \dots (1)$$

여기에, Q_i : 난방기에 의한 입력열량 (kcal · s⁻¹), C : 온실내부 열용량

(kcal · °C⁻¹), h : 총합열전달계수(kcal · °C⁻¹ · m⁻² · s⁻¹), A_g : 온실의 보온피복 전열면적 (m²), T_i : 온실 내부온도 (°C), T_o : 외기온 (°C), t : 시간 (s)이다.

(1)식을 Laplace 변환한 후 Q_i 를 주기 T(s)인 0차홀더 입력으로 가정할 때 하(1998)가 유도한 이산시간 시계열 방정식으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$T_i(k+1) = e^{-\frac{hA_g}{C} \tau} \cdot T_i(k) + \frac{1}{hA_g} N(1 - e^{-\frac{hA_g}{C} \tau}) \cdot Q_i(k) + (1 - e^{-\frac{hA_g}{C} \tau}) \cdot T_o(k) \dots \dots \dots (2)$$

$k = 0, 1, 2, 3 \dots$ 으로 계측 또는 제어주기의 단계적 회수를 나타낸다.

또한 제어입력 Q_i 는 온수보일러로부터 온수가 온실바닥에 배관된 방열관내를 유동할 때 방열관을 통해서 열전달이 이루어지므로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_i = q \cdot L(T_w - T_i) \dots \dots \dots (3)$$

여기에서, q : 방열관 단위길이당 방열량 (kcal · m⁻¹ · s⁻¹ · °C⁻¹), L : 방열관 길이 (m), T_w : 온수온도 (°C)이다. (3)식을 (2)식에 대입하여 정리하면, 온실난방계의 디지털 제어수식모형은 다음 식과 같이 된다.

$$T_i(k+1) = a_1 T_i(k) + a_2 T_w(k) + a_3 T_o(k) \dots \dots \dots (4)$$

여기서,

$$a_1 = e^{-\frac{hA_g}{C} \tau} - \frac{q \cdot L}{hA_g} (1 - e^{-\frac{hA_g}{C} \tau})$$

$$a_2 = \frac{q \cdot L}{hA_g} (1 - e^{-\frac{hA_g}{C} \tau})$$

$$a_3 = (1 - e^{-\frac{hA_g}{C} \tau}) \text{ 이다.}$$

위 수식(4)는 Udink ten Cate(1983)에 의해 소개된 1차지연모델의 이산화와 일치하지만, 겨울철 야간온도환경에 큰 영향을 미치는 외기온도 T_o 을 추가한 것이 다르다.

2. 온수공급 중단시 방열관내 온수의 온도 변화

보일러의 고온수와 방열관내 순환수를 3방향밸브로 조절하여 유동온수의 온도가 일정한 온수공급이 이루어지는 경우(제어 입력이 있는 경우)에는 (4)식에 의해 실내온도가 변화하지만, 실내온도가 제어목표치 이상 상승하여 고온수의 공급을 중단하면(제어입력이 추가되지 않는 경우) 방열관 내의 순환수가 냉각되면서 온실내에 열을 방출하게 되고, 이때 열전달은 다음과 같이 된다.

$$C_t \frac{dT_w}{dt} + q \cdot L(T_w - T_i) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

C_t 는 온수와 방열관의 열용량의 합 ($\text{kcal} \cdot \text{C}^{-1}$)이고, 위 식을 시간함수로 변환하면 다음과 같다.

$$T_w(t) = e^{-\frac{q \cdot L}{C_t} t} \times (T_{w0} - T_{i0}) + T_i(t) \dots\dots\dots (6)$$

여기서, T_{i0} 는 초기 실내온도(C)이고 T_{w0} 는 초기 온수온도(C)이다.

위 식에서 연속적 제어입력 변화가 없는 회수, 즉 고온수 공급이 없는 제어회수 m 에 대하여 시간 $t = mT$ 이므로 (6)식을 정리하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_w(mT) = e^{-\frac{q \cdot L}{C_t} mT} \times (T_{w0} - T_{i0}) + T_i(mT) \dots\dots\dots (7)$$

위의 식에 의하여 온수공급 중단시 온수온도 T_w 의 시계열 계산이 가능하며, (4)식의 $T_w(k-1)$ 항의 조건부 입력값이 된다.

재료 및 방법

1. 대상온실과 난방시스템

본 연구의 대상이 된 온실은 8연동의 벤로형 유리온실로서, 내부에 보온커튼이 설치되었고, 폭 51.2 m, 길이 96 m, 측고 3 m 및 동고 5 m이며, 내부 보온커튼을 기준한 전열면적은 $5,250 \text{ m}^2$ 이다. 보온상태는 외피복으로 1층 유리, 보온커튼으로 1층에 알루미늄섬피 1층 및 2층에 부직포 1층이다. 대상온실내에 설치되어 있는 보일러의 방열관 배관으로 50A 흑색관(외경 60.5 mm, 내경 52.9 mm)을 사용하였으며, 배관의 물리적 특성으로 정압비열 $434 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 열전도계수 $60.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 단위 길이당 중량 $73.2 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 및 방열량 $1.73 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 로 산정되었다. 배관 방식은 투입관, 리턴관, 회수관으로 구성되고, 유량이 균일하며 온도차가 제일 작은 리버스리턴식으로서, 3방향밸브를 이용하여 공급온수의 온도를 조절할 수 있도록 되어 있다. 온수보일러의 용량은 $900,000 \text{ kcal} \cdot \text{h}^{-1}$ 였다.

2. 방법

1) 제어수식모형 결정을 위한 실험

제어 시뮬레이션에 필요한 온도제어수식모형의 계수를 결정하기 위하여 대상온실에 설치한 컴퓨터 계측시스템을 이용하여 3분의 계측주기로서 (4)식에 관련된 온도변화를 계측하였다. 방열관 내의 온수공급은 밸브개폐를 임의로 조작하여 제어수식모형의 입력 T_w 를 변화시켰다. 100회의 계측된 결과로부터 다중회귀분석을 실시하여 식(4)의 파라미터를 구하고 오차항은 제거하였다.

2) 제어기법

(1) ON-OFF제어

이 알고리즘은 가장 간단한 제어기법으로써 목표치±제어불가능대역을 설정하여 계측치가 목표치를 0.3℃ 초과할 때, 제어기기의 작동을 중지(OFF)시키고, 목표치에 비해서 0.3℃ 낮으면 제어기기를 작동(ON)시키는 방법을 사용하였다.

(2) 비례제어(P제어)

비례제어기는 제어편차를 0으로 하기 위한 가장 기본적인 귀환제어계에 이용된다. 즉 제어편차에다 비례이득 K_p 을 곱하여 조작량으로 결정하는 것으로 다음과 같은 조작량 결정수식을 이용하였다.

$$T_w(k+1) = T_w(k) + K_p(T_{ref}(k) - T_i(k)) \dots\dots\dots (8)$$

위 식에서 K_p 는 비례이득, $T_{ref}(k)$ 은 온도의 설정치 또는 설정온도, $T_i(k)$ 는 제어된 실측온도, $T_w(k)$ 는 공급온수의 온도이다.

제어입력은 제어주기 시점에서 결정하여 제어동작을 행하게 되고 결정된 제어입력은 (8)식에 의하여 결정되기 때문에 0이하일 수도 있고 최대입력량을 초과할 수도 있다. 본 연구에서는 제어량 한계제한 루틴에서 최소·최대한계 처리를 행하였는데 제어량 한계처리를 거친 제어입력량은 항상 $0 \leq T_w(k) \leq T_c$ (보일러내 온수온도, 75℃)의 조건을 만족하도록 하였다.

(3) 비례적분제어(PI제어)

본 연구에 사용된 비례적분(PI)제어계의 속도 알고리즘은 다음과 같다.

$$T_w(k+1) = T_w(k) + K_p[T_i(k-1) - T_i(k)] + K_i[T_{ref}(k) - T_i(k)] \dots\dots\dots (9)$$

여기서 K_i 는 적분이득이고, $k = 0$ 시 $T_i(k-1)$ 은 0이다.

(4) 비례적분미분제어(PID제어)

비례적분(PI)제어기는 온실의 온도제어와 같은 응답성이 느린 경우에 사용한다. 응답속도의 개선을 위해 미분항(D동작)을 부가시킨 경우가 비례적분미분(PID)제어기이다.

본 연구에서 사용한 비례적분미분(PID)제어의 속도알고리즘은 다음 식과 같다.

$$T_w(k+1) = T_w(k) + K_p[T_i(k-1) - T_i(k)] + K_i[T_{ref}(k) - T_i(k)] + K_d[2T_i(k-1) - T_i(k-2) - T_i(k)] \dots\dots\dots (10)$$

여기서 K_d 는 미분이득이고, $k = 0$ 시 $T_i(k-1)$ 과 $T_i(k-2)$ 는 0이다.

3) 온도제어 시뮬레이션

제어기의 성능 판정은 기준입력(목표값)에 대한 제어량 변화를 수치화하여 판단하는데 본 연구에서는 기준입력을 계단입력(Step input)으로 하였다. 이 입력에 대한 제어량의 수속속도, 오버슈트 및 정상상태 오차를 측정하여서 제어성능을 판정하였다. 여기서 수속속도는 빨라야 하며, 오버슈트는 작을수록 그리고 정상상태에서의 오차가 작을수록 우수한 제어성능을 가지는 것으로 판정하였다.

제어조건으로는 제어목표값을 15℃로 하고, 초기 온수온도 $T_w(0)$ 는 10℃, 초기 실내온도 $T_i(0)$ 는 10℃, 실외 기온 $T_o(k)$ 는 5℃로 일정하게 하여서 시뮬레이션을 실시하였다.

각 제어기법에 대하여 별도의 제어프로그램을 작성하였고, 초기치 입력으로 각

제어기법에서 결정된 온수온도 T_w 를 식(4)에 대입하여 단계적으로 계산하였고, ON-OFF제어와 같이 제어입력이 전단계 값을 유지하는 경우는 식(7)에 의하여 온수온도를 결정하였다. 프로그램작성과 시물레이션을 위한 적용시 각각의 이득은 임의로 대입하였고, 최적의 응답특성을 나타내는 때의 이득을 제어기법의 최적 이득으로 결정하는 시행착오반복법을 이용하였다. 이와 같은 판단을 위해 각 제어단계별 제어입력과 온도변화를 데이터화하고 결과를 그래픽 처리하였다. 프로그램작성과 실행은 QBASIC 언어를 사용하였다. ON-OFF 제어 외의 각 제어기법에 대하여 별도의 제어프로그램을 작성하였고, 초기치 입력으로 각 제어기법에서 결정된 온수온도 T_w 를 식(4)에 대입하여 단계적으로 계산하였고, ON-OFF제어와 같이 제어입력이 전단계 값을 유지하는 경우는 식(7)에 의하여 온수온도를 결정하였다. 프로그램작성과 시물레이션을 위한 프로그램작성과 실행은 QBASIC 언어를 사용하였다. ON-OFF 제어 외의 각 제어기법 적용시 각각의 이득은 임의로 대입하였고, 최적의 응답특성을 나타내는 때의 이득을 제어기법의 최적 이득으로 결정하는 시행착오 반복법을 이용하였다. 이와 같은 판단을 위해 각 제어단계별 제어입력과 온도변화를 데이터화하고 결과를 그래픽 처리하였다.

결과 및 고찰

1. 제어수식모형의 결정

대상온실에 설치한 컴퓨터 계측시스템을 이용하여 계측주기 3분으로 실내온도, 실외온도 및 방열관내 온수온도 변화를 계측하여 (4)식을 다중회귀분석한 결과는 다음과 같이 나타났다.

$$T_i(k+1) = 0.851 \cdot T_i(k) + 0.055 \cdot T_w(k) + 0.094 \cdot T_o(k) \dots\dots\dots (11)$$

위 수식은 다중회귀분석에 의하여졌기 때문에 식의 상수항이 오차로서 존재하며, 이 오차는 0.18 °C 였다. 결정계수 $R^2=0.978$ 로서 수식(11)은 대상온실의 온도제어모델로 사용시 실제온도변화와 잘 일치하는 것으로 추정되었다. 따라서 식(11)은 $T_w(k)$ 와 $T_o(k)$ 의 변화에 따라 온실 실내온도 $T_i(k)$ 를 추정할 경우 오차가 0.18 °C 발생하므로 따로 식(11)의 적합성 검증은 필요 없는 것으로 판단된다. 식(11)의 모형을 이용하여 제어시물레이션을 실시할 경우 제어기법별 성능비교가 가능하며, 제어시물레이션에 의해 제어된 실내온도와 대상온실 내에서 실제로 제어한 실내온도의 차는 이 오차의 값 범위가 될 것으로 추측된다.

위 수식 (11)은 T_w 의 변화, 즉 온수가 보일러로부터 공급되어 3방향밸브에 의해 조절될 때의 실내온도 변화모형이며, 온수의 공급이 없는 때에는 T_w 는 방열관 내의 온수온도로 방열관이 식어지면서 온실에 열을 공급하므로 (7)식에 의하여 온수온도 T_w 가 구해진다.

방열관의 조사된 특성과 방열관의 설계자료로서 온수와 방열관의 열용량을 구한 결과, 각각 1142.8 kcal · °C⁻¹ 와 427.5 kcal · °C⁻¹로서 이들 열용량의 합은 1570 kcal · °C⁻¹로 나타났다.

(7)식에 위의 계산된 수치와 제어주기 $T=3$ 분을 대입하면 연속적 제어입력이 없는 m 회의 제어주기에 대한 온수온도 변화모형은 다음과 같이 정리된다.

$$T_w(mT) = e^{-0.3716 \cdot m} \times (T_{wo} - T_{io}) + T_i(mT)$$

.....(12)

2. 제어 시뮬레이션

계단입력과정은 기준입력에 대한 변화를 알아보기 위한 과정이다. 이 과정에서 수속속도, 오버슈트 및 정상상태 오차를 측정하여서 제어성능을 판정한다. 위의 경우에 대하여 제어성능을 파악하기 위하여 ON-OFF 제어, 비례제어, 비례적분제어, 비례적분미분제어등 각각의 제어기법으로 제어 시뮬레이션을 실시한 결과는 다음과 같다.

1) ON-OFF제어

일반적으로 보일러에서 온실로 공급되는 온수의 온도인 75℃를 그대로 이용한 ON-OFF제어시와 보일러 공급 온수온도를 75℃이하로 하였을 경우에 대하여 제어성능을 비교하였다.

Fig. 1은 제어주기가 3분인 경우의 온수의 온도변화에 따른 온-오프제어 시뮬레이션의 결과를 나타낸 그림이다. 제어불가능 대역을 ±0.3℃로 설정하여 예측된 실내온도와 비교하여 예측된 실내온도가 제어불가능 대역을 벗어나면 제어입력을 행하였다.

Fig. 1의 (a)는 온수의 온도를 75℃로 시뮬레이션한 결과로서 제어오차는 +3.5℃, 오버슈트는 3.5℃, 정상상태에 도달하는 시간은 무한이었으며, 제어입력의 진폭변동이 자주 발생하였다. 제어오차가 ±2% 이내로 되는 시간을 정상상태 도달시간으로 정의하였기 때문에 정상상태 도달시간이 무한인 것으로 나타났으나, 도달시간 9

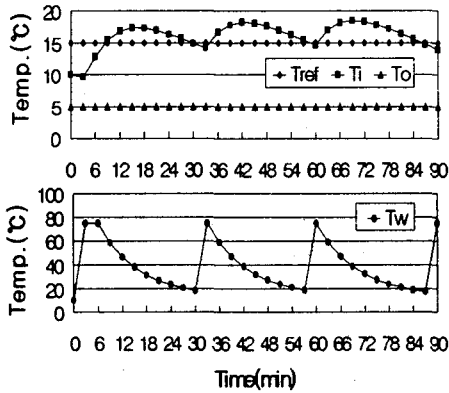
초로 볼 때 그 이후는 연속된 제어오차가 +3.5℃로 발생하는 것으로도 평가할수 있다. 이와 같은 결과는 온수의 공급 온도가 너무 높아서 온실내로 유입되는열량이 필요열량보다 많기 때문에 적정한 온수 온도를 공급하면 정상상태 도달시간과 제어오차가 줄어들 것으로 생각된다. 본 연구에서는 이를 위하여 온수온도를 변경한 경우도 제어시뮬레이션을 실시하였다.

그 결과 공급온수온도가 35℃에서 제어성능이 가장 좋은 것으로 나타났고, 비교를 위해서 30℃의 경우도 도표화하였다.

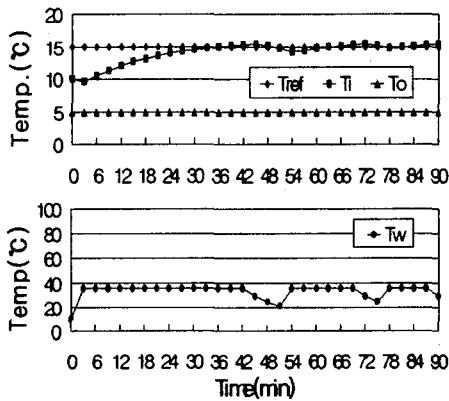
Fig. 1의 (b)는 온수의 온도를 35℃로 시뮬레이션한 결과로서 제어오차는 +0.83℃, 오버슈트는 0.83℃, 정상상태에 도달하는 시간은 30분으로 나타났고, 제어입력에서의 진폭 변동은 75℃의 경우보다 자주 일어나지 않았다.

Fig. 1의 (c)는 온수의 온도를 30℃로 행한 결과이며 예측된 실내온도가 목표치 온도에 미치지 못하는 것으로 나타났으며, 제어입력에서의 진폭변동은 온수 온도를 30℃로 입력을 하였기 때문에 30℃로 일정하게 나타났다.

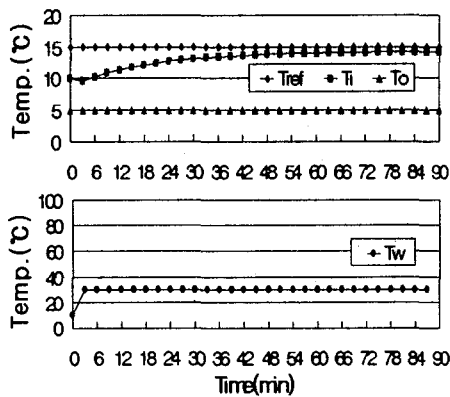
공급온수의 온도를 35℃로 하였을 경우, 일반적으로 사용하는 온수의 온도인 75℃의 경우보다 제어오차를 2.67℃정도 낮출수 있는 것으로 나타났다. 따라서 제어성능은 온실의 내부온도와 외부온도차에 의해서 열이 실외로 방출되는 량과 거의 동일한 열량을 온실내로 입력하였을 때 제어성능이 좋아지는 것으로 판단된다. Fig. 1에서는 외부온도를 5℃로 한 경우인데 외부온도가 이 보다 낮은 -5℃이라면 공급되는 온수온도는 70℃정도가 적합한 것으로 판단된다.



(a) $T_w = 75^\circ\text{C}$



(b) $T_w = 35^\circ\text{C}$



(c) $T_w = 30^\circ\text{C}$

Fig. 1. Simulation results of ON-OFF control depending on supplying hot-water temperature (T_w) level.

이상의 결과를 종합하면, 일반적으로 공급되는 온수의 온도는 외기온에 따라 ON-OFF 제어를 한 경우에도 제어성능이 우수한 것으로 판단된다.

종래의 일정 온도의 온수를 공급하여 ON-OFF 제어하는 방식을 벗어나서 계절에 따라 온수의 온도를 조절하는 것이 에너지 비용이나 제어효율 측면에서 유리한 것으로 판단된다.

2) 비례제어

비례이득 값에 따라서 제어성능이 달라지므로 이득을 구하기 위하여 임의로 값들을 대입하고 그 값이 잘 맞는 것을 선정하고 나서 다시 상하의 값들을 선정하여서 최고 잘 맞는 이득을 구하였고 다시 계속하여 반복하는 식의 시행착오 반복법을 행하여서 제어성능이 가장 우수한 이득을 찾아내고, 이 이득값의 상하의 값과 비교하여 각 제어이득별 제어성능을 분석하였다.

Fig. 2는 비례이득을 36으로 한 경우의 제어결과로서 제어오차는 $+0.51^\circ\text{C}$, 오버슈트는 2.37°C , 정상상태에 도달하는 시간(정정시간)은 30분으로 나타났으며, 제어입력에 있어서 약간의 진폭 변동이 나타났다.

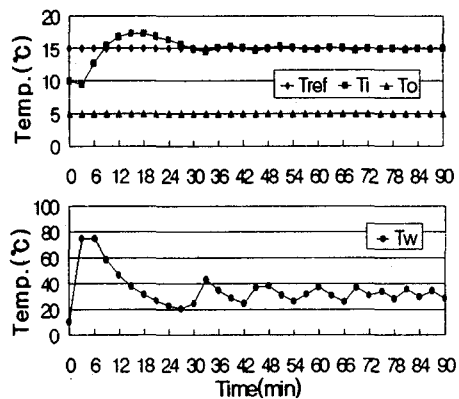


Fig. 2. Simulation results of proportional control when K_b is 36.

비례이득(K_p)을 45로 한 경우의 제어 결과는 제어오차가 $+0.6^{\circ}\text{C}$, 오버슈트는 2.23°C , 정정시간은 약 57분으로 나타났고, 비례이득을 25로 한 경우의 제어 결과는 제어오차가 $+0.58^{\circ}\text{C}$, 오버슈트는 2.31°C , 정상상태에 도달하는 시간은 45분으로 나타났으며, 제어입력에서의 진폭변동이 있는 것으로 나타났다. 비례이득 36일 때가 최적의 응답특성을 보였고, 이보다 큰 이득을 갖는 때는 오버슈트 값이 커지며, 이보다 작은 이득에 대하여는 오버 슈트는 작지만 정정시간이 길게되는 경향으로 나타났다.

따라서 비례이득이 36인 경우가 제어 성능이 가장 우수한 것으로 판단되며, 온수의 공급온도는 제어초기에 상승하여 온실내 온도가 제어목표치 온도에 도달하면 약간의 진폭을 갖는 일정온도가 유지되었다. 이것은 비례제어의 경우 온수온도조절에 의한 온실내 온도제어의 방법이기 때문에, 온수온도가 일정한 ON-OFF제어보다 제어성능의 향상을 가져오는 것은 당연한 결과로서 판단된다.

3) 비례적분(PI)제어

비례이득(K_p)값과 적분이득(K_i)값에 따라서 제어성능이 달라지므로 수십회의 반복으로 제어성능이 가장 우수한 이득을 찾아내고, 각 제어이득별 제어성능을 분석하였다.

Fig. 3은 제어주기 3분으로, $K_p=20$, $K_i=10$ 으로 한 경우의 제어결과를 나타낸 것으로 제어오차는 $+0.23^{\circ}\text{C}$, 정정시간은 21분으로 나타났고 제어입력에서의 진폭변동은 정상상태 이후에 없었다. 성능의 차이가 거의 없는 $K_p=24$, $K_i=15$ 로 한 경우의 제어결과는 제어오차가 $+0.30^{\circ}\text{C}$, 오버슈트는 $+0.08^{\circ}\text{C}$, 정정시간은 약 18분이었으며, 제어입력에서의 진폭변동도 나타났다. 또한 $K_p=15$, $K_i=20$ 으로 한 경우의

제어결과는 제어오차는 $+0.30^{\circ}\text{C}$, 오버슈트는 $+2.13^{\circ}\text{C}$ 로 나타났고, 정정시간은 30분이며, 제어입력에서의 진폭변동이 약간 나타났다.

따라서 K_p 가 20, K_i 가 10인 경우가 제어 성능이 가장 좋은 것으로 나타났다. K_p 가 최적의 값보다 크게 될수록 공급온수의 진폭변화(제어입력변동지수)가 크게 나타나고, 제어량의 변동도 큰 것으로 나타났다.

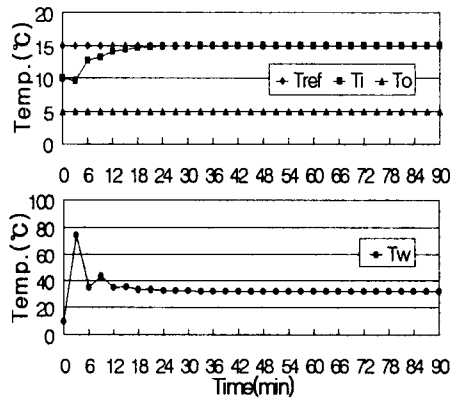


Fig. 3. Simulation results of PI control when K_p and K_i are 20 and 10, respectively.

K_i 는 1차제어계인 경우 정상상태오차를 없애는 역할을 하는데 온실의 온도제어와 같이 제어응답이 느린 경우는 절대적으로 고려되어야 할 이득이다. 적분이득이 없는 비례제어에 비하여 제어량(실내온도)이 상당히 안정된 경향을 보였다.

4) 비례적분미분제어

비례이득(K_p)값, 적분이득(K_i)값과 미분이득(K_d)값에 따라서 제어된 성능이 달라지므로 임의로 값들을 대입하고 그 값이 잘 맞는 것을 선정하고 나서 다시 상하의 값들을 선정하여서 최고 잘 맞는 이득을 구하였고 다시 계속하여 반복하는

식의 시행착오법에 행하여서 제어성능이 가장 우수한 이득을 찾아내고, 각각 제어이득별 제어성능을 분석하였다.

Fig. 4는 제어주기가 3분인 경우의 비례적분미분(PID)제어 기법에 의한 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸 그림이다. 이때의 각 이득 $K_p=20$, $K_i=10$, $K_d=0.01$ 이었고 시뮬레이션에 의한 제어결과는 제어오차가 $+0.23^\circ\text{C}$, 정정시간은 18분으로 나타났고, 제어입력에서의 진폭변동은 정상상태

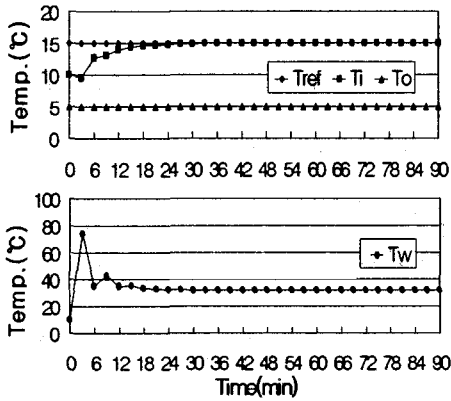


Fig. 4. Simulation results of PID control when K_p , K_i and K_d are 20, 10 and 0.01, respectively.

도달 후 아무런 변화도 없이 일정하게 유지되었다. $K_p=30$, $K_i=10$, $K_d=0.01$ 로 한 경우의 제어결과는 오버슈트가 0.81°C , 제어오차는 $+0.48^\circ\text{C}$, 정정시간은 51분으로 나타났으며, 제어입력에서의 진폭변동은 약간 있는 것으로 나타났다. 최적의 제어성능에 접근한 경우로서 $K_p=15$, $K_i=20$, $K_d=0.01$ 로 한 경우의 제어결과로서 제어오차는 $+0.38^\circ\text{C}$, 오버슈트는 0.38°C 로 나타났고, 정상상태에 도달하는 시간은 18분이며 제어입력에 있어서 변동이 약간 있는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하면 비례적분제어와 비례적분미분제어는 제어오차와 오버슈트 등 제어성능이 거의 같은 것으로 나타났으며, 여

기에서 미분이득은 온실의 환경에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났는데, 이것은 온실 내부온도의 상승 하강 속도가 매우 느리기 때문에 제어속도를 빨리 할 수 있는 한계점 또한 크기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 온실과 같이 응답속도가 느린 제어계는 PI제어만으로 제어성능을 충분히 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

일반적으로 일정 온수공급에 의한 ON-OFF제어보다 온수온도 조절에 의한 제어가 그 결과에서 우수하게 나타나고, 비례제어보다는 비례적분이상의 제어가 성능이 좋은 것임을 알 수 있었다. 적분항은 현재 제어되는 온수온도가 제어가 진행된 다음 단계까지 미치는 영향을 고려하기 때문에 온실과 같이 응답속도가 느린 제어계에서는 빠뜨려서는 안될 제어요소로 판단된다.

관행적인 ON-OFF제어는 온수온도를 겨울철 최대 한계공급이 되도록 75°C 로 하여 ON-OFF제어를 실시하고 있는데, 일반적인 일정온도의 온수를 공급하는 ON-OFF 제어 방식을 벗어나 계절 및 기상환경 조건에 따라 온수의 온도를 조절하는 것이 제어성능을 향상시키는 것뿐만 아니라 에너지 절감에 좋은 것으로 판단된다. Table 1은 각 제어기법별 최적의 이득을 취했을 때 ON-OFF제어와 제어성능을 비교한 것이다.

Table 1. Comparison of control performances among control methods.

Method	Error ($^\circ\text{C}$)	Settling Time (min)	Overshoot ($^\circ\text{C}$)
ON-OFF	3.50	-	3.50
P	0.51	30	2.37
PI	0.23	21	0.00
PID	0.23	18	0.00

제어성능은 비례적분제어, 비례적분미분 제어 > 비례제어 > 온-오프제어의 순으로 제어성능이 우수한 것으로 나타났다. 비례적분제어와 비례적분미분제어는 제어 오차와 오버슈트 등의 제어성능이 거의 같은 것으로 나타났으며, 여기에서 미분이득은 온실의 환경에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. Table 1에서 ON-OFF제어시 온수온도는 일상적인 7 5℃로 한 것인데, 온수온도를 35℃로 일정하게 하면 제어오차 0.83℃, 오버슈트 0.8 3℃ 및 정정시간 33분으로 개선될 수 있었다. 제어 시뮬레이션에 이용된 수식모형의 적합성 오차 0.18℃ 및 밸브조작오차를 고려하면, 김 등(1998)이 PLC를 이용하여 온실에서 직접 ON-OFF 및 PI제어한 오차가 1℃와 0.6℃인 것과 유사한 결과가 얻어졌다.

이상에서 온수난방시스템온실의 온도제어는 3방향밸브 여닫음에 의한 방열관내 순환수의 온도를 변화시켜 제어하는 것이 바람직하며, 제어기법으로는 비례적분(PI)제어가 유효한 것으로 나타났다. 그러나 온실은 바람의 영향과 계절적인 환경변화의 영향에 의해 식(11)의 파라미터가 변화하므로 실제 제어오차는 Table 1의 결과보다 크게 나타날 것으로 생각되며, 이에 대응하는 적응제어의 도입도 향후 검토되어야 할 것으로 생각된다.

적 요

온수난방시스템 온실의 디지털 온도제어 수식모형을 수립하고, 이 수식모형을 이용하여 제어시뮬레이션을 실시하여 최적의 온도제어 방법을 구명하였다. 이용된 제어기법은 종래의 온수온도 일정 공급 ON-OFF 제어, 비례제어, PI 제어, PID제

어기법이었으며, 시뮬레이션을 이용해 제어기법별 제어성능을 비교 분석 하였다.

대상유리온실의 실내온도(T_i)에 관한 디지털 제어수식모형은 공급온수온도(T_w)와 외기온도(T_o)가 관련된

$$T_i(k+1) = 0.851 \cdot T_i(k) + 0.055 \cdot T_w(k) + 0.094 \cdot T_o(k)$$

로 나타났다. 온실의 실내온도제어 시뮬레이션을 실시한 결과 종래의 온수온도 일정공급 ON-OFF 제어, P 제어, PI 제어, PID 제어의 정정시간, 오버슈트, 정상오차는 각각 무한, 3.50℃, 3.50℃ / 30분, 2.3 7℃, 0.51℃ / 21분, 0.00℃, 0.23℃ / 18분, 0.00℃, 0.23℃로 나타났으며, 온수난방시스템 온실의 온도제어에 가장 적합한 제어기법은 PI와 PID제어인 것으로 나타났다. 또한 미분이득은 온실의 난방계에 거의 영향을 미치지 않지만 적분이득은 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

인용문헌

1. 김동억, 조한근, 김형준. 1998. PLC를 이용한 온실의 환경제어. 한국농업기계학회지 23(6) : 599-606.
2. 민영봉, 김성태, 정태상. 1993. 그린하우스 온도제어 시뮬레이션. 경상대학교 논문집 32(2) : 139-145.
3. 서원명, 민영봉, 윤용철. 1990. Microcomputer를 이용한 greenhouse의 온도제어 system. 한국농업기계학회지 15(2) : 134-142.
4. 李相沃. 1995. 디지털 制御技法에 의한 溫室의 暖房制御 시뮬레이션. 慶尙大學校 碩士學位論文. p. 1-45.
5. 하종규. 1998. 온수난방시스템온실의 온도제어 시뮬레이션. 경상대학교 석사학위논문. p. 7-11.

6. 日本施設園芸協会. 1994. 施設園芸 핸드ブック. p. 170-174.
7. Udink ten Cate, A. J. 1983. Modeling and control of greenhouse climates. Wageningen Agric. Univ. p. 1-159.
8. Young, P.C., A. Chotai and W. Tych. 1993. Identification, estimation and true digital control of glasshouse system. In the Computerized Greenhouse (edited by Hashimoto et al., Academic Press Inc., NY.) p. 3-50.