

溫水暖房시스템 溫室의 溫度制御 시뮬레이션

Temperature Control Simulation for Greenhouse with Pipe Heating System.

민 영 봉* · 정 태 상** · 하 중 규***

*경상대학교 농업기계공학과 · **진주산업대학교 기계공학과 · ***원예연구소 시설재배과

Y. B. Min · T. S. Chung · J. K. Ha

*Gyeongsang Nat'l University · **Chinju Nat'l University · ***Nat'l Horticultural Research Inst.

1. 서론

최근 온실에 온수 보일러를 설치하여 실내를 가온하는 시스템이 많이 도입되고 있다. 이들 장치들은 설정된 실내온도를 맞추기 위한 온도 제어장치가 부가되어 있지만, 대부분 ON-OFF제어 시스템을 구성하고 있기 때문에 온도 진폭의 현상이 발생하여 온도 제어 정밀성이 떨어지고 에너지소비도 많다.

이 문제점을 해결하기 위하여는 보일러 온수저장조와 온실 내 방열관 사이에 삼방변을 설치하고 설정온도, 실내온도 및 외기온을 비교하여 삼방변의 위치를 조절하여야 한다.

본 연구는 종래의 ON-OFF제어, 온수온도조절 ON-OFF제어 및 디지털 제어 방식에 의한 순환온수온도의 연속제어기법을 설정하고, 이들의 제어성능 차이를 비교하여 가장 적합한 제어 방법을 모색코져 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

가. 대상온실과 난방 시스템

온실의 가온시 열수지모델 산정을 위하여 실험한 대상온실은 8연동 유리온실이며 내부에 보온커튼이 설치되었고, 폭×길이×축고×동고는 51.2×96×3×5m이며, 내부 보온커튼을 기준한 전열면적은 5250m²이다. 대상 실험온실내 온수난방시스템 온도제어를 위한 방열관은 50A 흑색관으로 방열량은 130kcal/m·hr로 계산하여 총길이 5,385m를 배관하는 것으로 하였다. 배관방식은 투입관, 리턴관, 회수관으로 구성되고, 삼방변(3Way Valve)를 이용하여 공급온수를 조작하도록 구성하였고, 온수 보일러의 용량은 900,000kcal/hr로 설계하였다.

나. 방법

1) 수식모형 결정을 위한 실험

수식모형의 계수결정을 위하여 온실에 계측시스템을 설치하여 3분 주기로 실내외의 온도변화를 계측하였다. 계측된 데이터는 다음 수식의 각 계수값을 구하는데 이용하였다. $T_i(k) = k_1 T_i(k-1) + k_2 T_w(k-1) + k_3 T_0(k-1)$ (1)

여기서, $T_i(k)$:온실내부온도(℃), $T_w(k)$:온수온도(℃), $T_o(k)$:외기온도(℃)이다. 위 수식은 일반화 열수지 모형으로부터 디지털수식으로 변환하고, 방열관의 온수온도를 입력변수로 하여 디지털제어 수식을 정리한 결과이다. 수식(2)는 각 제어주기 동안 연속하여 제어입력의 변화가 있을 경우인데 제어입력 변화 즉, 온수온도 조절이 없는 경우의 방열관내 온수온도는 다음 식과 같이 변화된다.

$$T_w(mT) = e^{-\frac{q \cdot L}{c_i}} \times (T_{w0} - T_{i0}) + T_i(mT) \quad (2)$$

여기서, m :제어입력이 없는 회수, T :제어주기(3분), q :방열관 단위길이당 방열량(kcal/m.s), c_i :온수와 방열관의 열용량의 합(kcal/℃), L :방열관길이(m), T_{w0} : $m=0$ 일 때 초기 온수온도(℃), T_{i0} : $m=0$ 일 때 초기 실내온도(℃)이다.

2) 제어기법

(1) ON-OFF제어

이 알고리즘의 일반적인 방법은 목표치±제어불가능대역을 설정하여 계측치가 목표치+0.3℃일 때 작동기를 오픈하고, 목표치-0.3℃이면 작동기를 온시키는 방법을 사용하였다.

(2) 비례제어

비례제어기는 제어편차 E를 0으로 하기 위한 가장 기본적인 귀환제어계이다. 본 연구에서 사용된 비례제어의 제어입력 계산은 다음식에 의하였다.

$$T_w(k) = T_w(k-1) + K_p(T_{ref}(k) - T_i(k)) \quad , \quad (3)$$

위식에서 단, $k=0, 1, 2, 3$, K_p 는 비례계인, $T_{ref}(k)$ 은 목표온도, $T_i(k)$ 는 제어된 실측온도, $T_w(k)$ 는 공급온수의 온도이다.

(3) PI제어

비례적분제어기는 편차의 적분항을 부가하여 I형으로 변환하면 정상오차가 제거된다. 본 연구에서 사용된 비례적분제어계의 속도 알고리즘은 다음과 같다.

$$T_w(k) = T_w(k-1) + K_p[T_i(k-1) - T_i(k)] + K_i[T_{ref}(k) - T_i(k)] \quad (4)$$

여기에서 $T_w(k)$: 제어입력인 온수의 온도, $T_i(k)$: 온실의 내부온도, $T_{ref}(k)$: 온실의 설정온도이다.

(4) PID제어

비례적분제어기는 온실의 온도제어와 같은 응답성이 느린 경우에 사용한다. 응답속도의 개선을 위해 미분항(D)을 부가시킨 경우가 비례적분미분제어기이다. 본 연구에서 사용된 비례적분제어계의 속도 알고리즘은 다음과 같다.

$$T_w(k) = T_w(k-1) + K_p[T_i(k-1) - T_i(k)] + K_i[T_{ref}(k) - T_i(k)] + K_d[2T_i(k-1) - T_i(k-2) - T_i(k)] \quad (5)$$

여기서, $T_w(k)$: 제어입력인 온수의 온도, $T_i(k)$: 온실의 내부온도, $T_{ref}(k)$: 온실의 설정온도이다.

3) 온도제어 시뮬레이션

(1) 난방 제어계 수식 모형

온실의 실내외 온도변화 예측데이터를 이용하여 (1),(2)식의 각 계수를 회귀 분석에 의하여 구한 결과는 다음과 같다.

$$T_i(k) = 0.851 T_i(k-1) + 0.055 T_w(k-1) + 0.094 T_o(k-1) \quad (6)$$

$$T_w(mT) = e^{-0.3716 \cdot m} \times (T_{wo} - T_{io}) + T_i(mT) \quad (7)$$

(2) 온도제어 시뮬레이션

실내온도는 제어입력인 온수온도변화에 따라 수식(6)과 같이 변화하는 것으로 가정하고 제어입력변화가 없는 때는 수식(7)로서 온수온도가 변화하는 것으로 가정하였다. 제어입력은 각 적용제어기법에 의해 계산하였다. 컴퓨터계산에 의한 시뮬레이션 프로그램은 킷베이직을 이용하였다. 실내설정온도를 계단입력으로 하였을 때 각 제어기법별 성능을 계산하였다.

계단입력과정은 기준입력에 대한 변화를 알아보기 위한 과정이다. 이 과정에서 수속속도, 오버슈트 및 정상상태 오차를 측정하여서 제어성능을 판정하였다. 제어조건으로는 제어목표 값을 15°C로 하고, 초기 온수온도 $T_w(0)$ 는 10°C, 초기 실내온도 $T_i(0)$ 는 10°C, 실외 기온 $T_o(k)$ 는 5°C로 일정하게 하여 시뮬레이션을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 각제어기법별 성능

각 제어기법을 이용하여 제어시뮬레이션을 실시하고 최적의 응답을 나타낸 조건에서 제어결과를 나타낸 것은 그림1과 같다.

1) ON-OFF제어

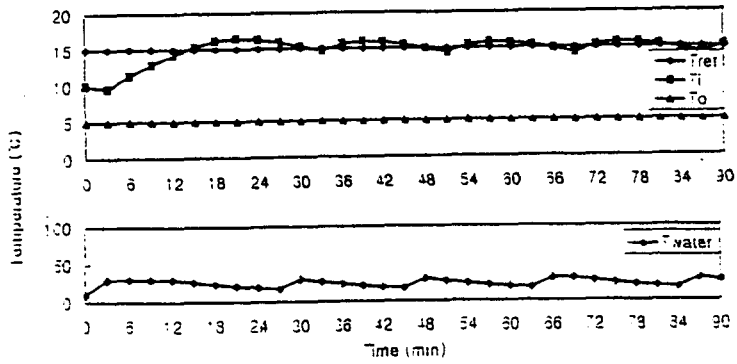
보일러에서 온실로 공급되는 온수의 온도인 75°C를 그대로 이용한 ON-OFF제어시와 보일러 공급온수온도를 35°C 및 30°C로 하였을 경우에 대하여 제어성능을 비교하였다. 일반적으로 공급되는 온수의 온도는 외기온에 따라 조절 되는 것이 우수한 제어성능을 나타내었다.

2) 비례제어

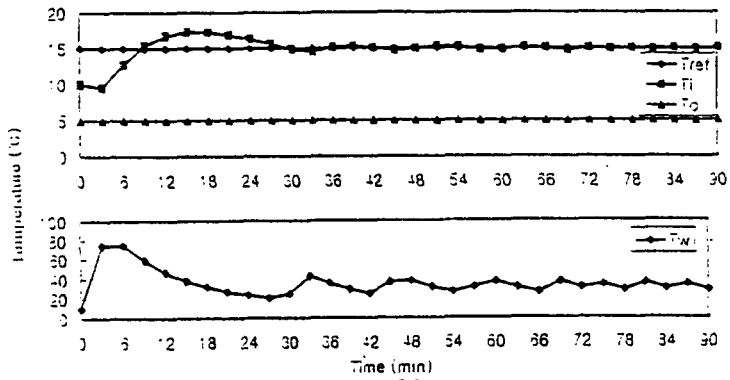
비례제인 값에 따라서 제어성능이 달라지므로 시행착오반복법으로 최적제인을 찾고, 이 제인값의 상하 값과 비교하여 각 제어제인별 제어성능을 분석하였다. 비례제인 36에서 제어오차 +0.51°C, 정정시간 30분, 제어입력변동지수가 12.23으로 가장 우수한 제어성능을 나타내었다. 이하 PI제어, PID제어도 최적제인을 찾는 방법은 이와 같은 방법이다.

3) PI제어

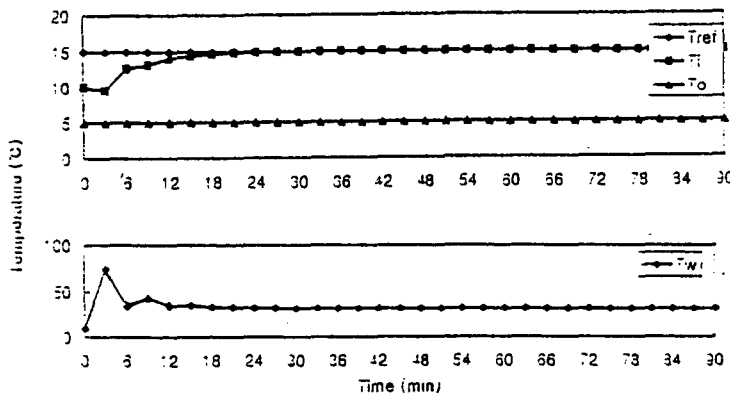
K_p 가 20, K_i 가 10일 경우에 제어오차 +0.23°C, 제어입력변동지수 8.62, 오버슈트가 나타나지 않았으며, 제어성능이 가장 좋은 것으로 나타났다.



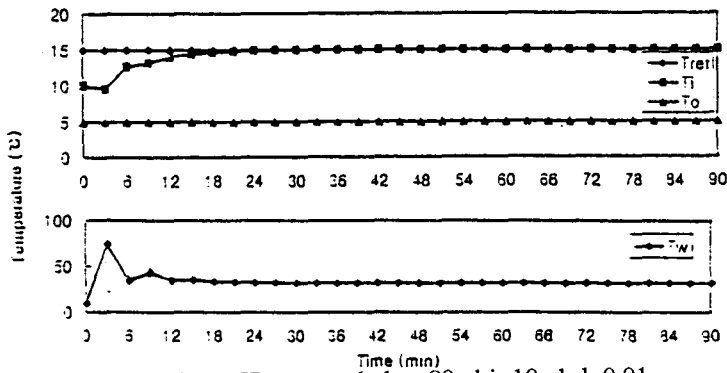
(a) ON-OFF control, $T_w = 35^\circ\text{C}$



(b) P control, $k_p=36$



(c) PI control, $k_p=20, k_i=10$



(d) PID control, $k_p=20, k_i=10, k_d=0.01$

Fig. 1. Control results simulated from each control methods.

4) PID제어

비례게인(Kp)=20, 적분게인(Ki)=10, 미분게인(Kd)=0.01에서 가장 우수한 제어 성능을 나타내었다. 비례적분제어와 비례적분미분제어는 제어오차와 오버슈트 등 제어성능이 거의 같은 것으로 나타났으며, 여기에서 미분게인은 온실의 환경에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났는데 이것은 온실의 내부온도 상승하강 속도가 매우 느리기 때문에 제어속도를 빨리 할 수 있는 한계점 또한 크기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 온실과 같이 응답속도가 느린 제어계는 PI제어만으로 제어성능을 충분히 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

나. 성능비교

각 제어기법별 제어성능이 가장 좋게 나타나는 조건에 대하여 조사된 성능을 비교한 것은 표1과 같다.

Tabl 1. Comparion of Control Performance.

Control Method	Over shoot(℃)	Setting Time(min)	Error
ON-OFF	3.50	17	±3.50
P	2.23	30	±0.51
PI	0.00	21	±0.23
PID	0.23	18	±0.23

4. 요약 및 결론

본 논문에서는 온실 내부열용량을 산출하여 온실의 온수난방 수식모형을 수립하여, 유리온실의 바닥 배관방식의 온수 방열관 배관, 온수공급시스템을 문헌 자료를 통해 적합하게 산출하여 온수난방시스템을 설계하고, 설계된 난방시스템의 디지털 온도제어 수식모형을 수립하여 제어시물레이션을 실시하고 최적의 온도제어 방법을 구명하였다. 이용된 제어기법은 종래의 온수온도 일정 공급 ON-OFF 제어, 비례제어, PI 제어, PID 제어기법이 있으며, 시물레이션을 이용해 제어기법별 제어성능을 비교 분석하여 최적제어기법을 도출한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1.대상유리온실의 실내온도에 관한 디지털 제어수식모형은 다음식과 같다.

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

2.제어시물레이션을 실시한 결과, 종래의 온수온도 일정공급 ON-OFF제어, P제어, PI제어, PID제어의 정정시간, 오버슈트, 정상오차는 각각 90분, +0.04℃, -2.0℃, 24분, +1.4℃, +0.41℃, 18분, +0.17℃, +0.17℃, -18분, +0.17℃, +0.17℃로 나타났다.

3.제어시물레이션을 결과 PI제어와 PID제어가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 미분게인은 온실의 난방계에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Bailey, B. J. and I. Seginer. 1989. Optimum control of greenhouse heating. *Acta Horticulturae* 245 : 512-518
2. P. G. H. Kamp., G. J. Timmerman. 1990. Computerized Environmental Control in Greenhouse. IPC-piant Ede.
3. Tantau, H. J. 1985. Greenhouse climate control using mathematical models. *Acta Horticulturae* 174 : 449-459.
4. Udink ten Cate, A. J. 1985. Modeling and simulation in greenhouse climate control. *Acta Horticulturae* 174 : 461-468.
5. 高橋安人. 1985. デジタル制御. 岩波書店. 東京.
6. 河鐘奎. 1998. 溫水暖房시스템 溫室의 溫度制御 시뮬레이션. 慶尙大學校 碩士學位論.
7. 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.
8. 閔永鳳, 金成泰, 鄭泰相. 1993. 그린하우스 溫度制御 시뮬레이션. 慶尙大學校 論文集 32(2) : 139-145.