

실내 기후 실험동에서의 추종 온도제어

Temperature tracking in a large scale environmental chamber

경 남 호*, 정 병 목**, 배 철 호**, 신 기 식*, 서 항 석***
 N. H. Kyong, B. M. Chung, C. H. Bai, K. S. Shin, H. S. Suh

1. 머리말

모든 건축, 토목용 부자재, 시공법이나 자동차, 항공기, 군용장비 등의 기계, 화공 제품 및 전기전자제품은 외기 기후조건이 변화함에 따라 특성이 달라지게 되므로 적재, 적소에 기자재나 제품을 효율적으로 사용하거나 적용되기 위해서는 일간, 월간, 연간 기후변화를 실내기후 실험동내에 조성하여 실험을 수행하는 것이 필수적이다. 예를 들면 광범위한 온도 범위에서도 작동할 수 있는 고가의 군용 IC Chip을 실내에서만 사용하는 기자재에 부착할 필요가 없으며 고온에서의 단열 특성은 좋으나 습기에 약한 유리섬유를 습기가 많은 건물 지하실 단열에 사용한다면 효과적인 단열이 되지 않을 것이며 연간 온도 변화가 크지 않은 지방의 조립식 주택용 접착제 (Glue)를 일교차가 큰 사막지방에 적용한다면 심한 경우에 붕괴의 위험마저 따를 수 있을 것이다.

기후조건에 대한 성능평가의 가장 간단한 방법은 실제 제품, 특히 시험용 건물 등을 적용 대상 지역의 외기 중에 두어 시험하는 것이지만 이 경우에는 적어도 수년간의 시험 기간과 막대한 인

력과 경비가 필요하게 되므로 대단히 비효율적이다. 따라서 선진 외국에서는 이미 오래전부터 실험실 내의 특정 공간에 인공기후를 조성하는 실내기후실험실을 이용하여 성능시험을 수행하여 왔는데 소형제품인 경우에는 성능시험기가 비교적 저가로 상용화되어 있어서 그다지 큰 문제점이 없으나 대형장비나 건물의 경우에는 용도에 따라 특수한 기술이 필요해 진다. 구체적인 예로서 탱크의 포신 발포 성능 시험에는 특별한 충격 및 진동흡수장치가 필요하며 건물의 열성능 시험에는 일사모사를 위한 인공태양과 강우, 강설 및 일교차를 구현할 수 있는 제어능력이 갖추어져야 한다는 점등을 들 수 있다. 외기 기후가 변화함에 따른 반응을 연구하기 위해서는 실내기후 실험동내에서 일정한 온도를 유지하는 것이 필요할 뿐 아니라 계절에 따른 일일 온도변화와 단축 사이클 특성을 재현해 낼 수 있어야 한다.

본문에서는 실내기후실험동내에서 일일 온도 변화를 재현하기 위한 추종 제어에 관해 설명하였으며 사용한 실내기후 실험동은 “대형 환경 Chamber 이용기술”(공기조화 냉동공학, 제23권 3호, 1994)에서 밝힌 바와 같다. 일일 온도 변화 재현을 위해서는 온도 추종 제어(temperature tracking) 기술이 필요한 데 일반적으로 추종제어는 수 단계에 걸친 ramp와 soak로 설정하도록 되어 있다. 본 연구에서는 일일 온도변

* 한국에너지 기술연구소 건물설비 연구팀

** 영남대학교 기계공학과

*** 한국에너지 기술연구소 건물연구부

화가 sine 파형을 가지고 있는 것으로 간주하고 sine파 1주기를 수십단계로 잘라서 sine 파형을 ramp와 soak로 재구성하여야 하는 기법을 사용하였다. 보통 시중의 stand alone 제어기들은 수단계의 설정치만을 가지고 있어 sine파 재현이 불가하므로 당 실내 기후 실험실에서는 Honeywell사의 PLC를 이용하여 PID제어으로써 일일 온도변화를 재현하고 실험적으로 검증하였다.

2. 추종 제어

2.1. 추종제어의 PID 기초이론

피드백제어의 목적은 동적 시스템의 출력변수가 기준입력의 종류나 외란 또는 시스템의 변수가 변화함에도 불구하고 원하는 기준경로를 추종시키고, 정상상태 특성을 개선하며, 외란제거 효과를 가져오고, 파라미터 변동에 대한 민감도를 줄여 주는데 있다. 원하는 기준 경로가 일정한 경우를(regulation), 기준경로가 시간에 따라 변하는 경우를 추종(tracking)으로 구분된다.

부하나 외란이 없을 경우에 정상상태에서 시스템이 일정한 온도를 잘 유지하기 위한 개루프 제어에서의 특성은 다음과 같다.

$$u = Kr$$

$$y = Au$$

$y = r$ 이 되기 위해서는

$$y = Au = AKr = r \text{이다.}$$

따라서 제어기 K 는 $1/A$ (즉, A^{-1})가 되어야 함을 알 수 있고 제어기가 시스템의 역모델로 설계되면 에러는 $e = y - r = 0$ 이다.

그러나, 여기서 외란 w 가 존재하면 $y = Au + Bw$ 이므로 에러는 $e = y - r = Bw$ 가 된다. 이것의 의미는 개루프 제어의 경우, 제어 설계자는 오차의 크기를 결정하는 파라미터 B 에 어떠한 영향도 줄 수가 없다는 것이고 다시 말해, 미리 고려한 시스템에 대해서는 잘 동작할 수 있지만 예상치 못한 상황에 대해서는 대응할 능력이 전혀 없음을 보여준다.

마찬가지로, 정상상태에서 시스템이 일정한 온도를 잘 유지하는 페루프 제어에서의 제어기를 설계하면 다음과 같다.

제어기의 출력은 $u = K(r - y)$ 이고, 이에 따른 시스템의 출력은 $y = Au$ 이므로 $y = Au = AK(r - y)$ 에서

$$y = \frac{AK}{1 + AK} r \text{이 된다.}$$

따라서 에러는 $e = r - y = \frac{1}{1 + AK} r$ 이므로 에러가 제로되기 위해서는 분모인 $(1 + AK)$ 가 분자인 1 보다도 굉장히 큰 값이 되어야 하므로 $AK \gg 1$ 이 되도록 설계하면 된다. 이 경우 시스템의 동적 모델 A 는 시스템에 대해 고정되어 있으므로 제어기 K 를 아주 큰 값으로 설계하면 $y_{ss} = r$ 이 된다.

이 경우에 대해서도 외란 w 의 영향을 고려해 보면

$$y_{ss} = \frac{AK}{1 + AK} r + \frac{B}{1 + AK} w \text{이므로}$$

이 경우에는 설계자가 K 값을 $AK \gg 1$ 이고 $AK \gg B$ 가 되도록 선정할 수 있다면 외란부하에 상관없이 거의 무시할 정도의 오차만이 발생할 것이다. 즉, 페루프 시스템에서의 외란의 영향은 개루프 시스템에 비해 정확하게 $(1 + AK)$ 배 작음을 알 수 있다.

시스템이 동적이고 시변입력을 추적하는 경우, 즉 추종제어에 대해서는 상수 계인의 개루프 제어기는 기준 또는 외란 입력에 대한 시스템의 동역학에 아무런 영향을 미치지 않지만 피드백은 시스템의 동역학을 변화시킨다. Dynamics를 포함한 시스템이 2차일 경우 두 개의 시정수 τ_1 과 τ_2 에 의해 묘사되므로 시스템 A 가 $\frac{A}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$ 로 표현된다고 가정할 수 있다. 이때 개루프 제어의 경우 시스템의 응답은 다음과 같다.

$$Y(s) = \frac{A}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} U(s) + \frac{B}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} W(s)$$

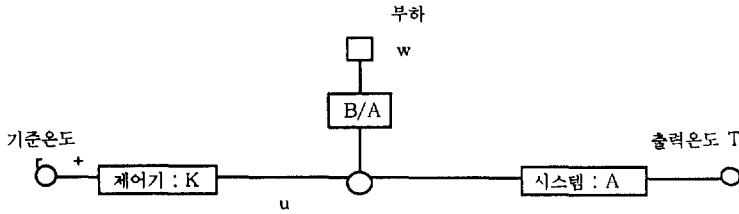


그림 1 Open-loop control system

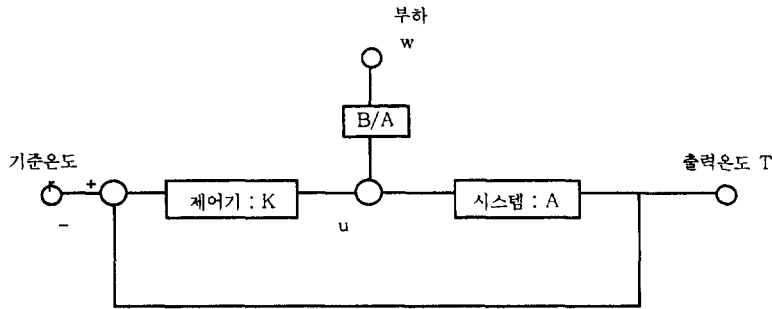


그림 2 Closed-loop control system

시스템의 특성방정식의 근은 $s_1 = -\frac{1}{\tau_1}, s_2 = -\frac{1}{\tau_2}$

로 변하지 않음을 알 수 있지만 페루프 제어에 의한 경우는 제어게인 K에 따라 즉 특성방정식의 근이 변한다. 즉, 피드백 제어의 동역학 방정식이

$$\begin{aligned} & \{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) + AK\} Y(s) \\ & = AKR(s) + BW(s) \text{ 이므로} \end{aligned}$$

특성방정식의 근은 다음과 같다.

$$s_{1,2} = \frac{-(\tau_1 + \tau_2) \pm \sqrt{(\tau_1 + \tau_2)^2 - 4\tau_1\tau_2(1 + AK)}}{2\tau_1\tau_2}$$

그러므로 시정수 $1/|s_{1,2}|$ 는 피드백 게인 K가 증가함에 따라 변한다. 피드백 게인이 증가함에 따라 페루프 시스템이 더 빠른 응답을 갖지만 이러한 게인이 증가함에 따라 전형적으로 감소가 잘 안되며 불안정해질 수도 있다. 그래서 외란과 플랜트 파라미터 변화에 대한 효과를 줄일 수 있는 게인의 크기에는 한계가 있다. 미소한 정상상태 오차와 적절한 과도 또는 동적응답 사이의 상충을 해결하기 위한 시도로서 피드백 제어기에는

비례(P), 적분(I), 그리고 미분(D) 항목들을 사용해 왔다.

비례-적분-미분(PID) 제어는 프로세스 산업계에서 제어기 설계를 위해 널리 사용되고 있는 경험적인 접근법으로 비례제어라고 불리는 상수 게인(constant gain) 제어, 비례제어와 결합하여 정상상태오차특성을 개선하는 적분제어, 그리고 과도특성을 개선하는 미분제어등으로 구성된다.

비례제어의 일반적인 형태는 $u = Ke$ 이며 제어기의 전달함수 $D(s)$ 는 K이다.

비례제어기는 일정한 기준입력에 대하여 정상상태 오프셋(또는 droop)이 발생할 수도 있으며 일정한 외란을 완전히 제거할 수도 없다. 고차 시스템의 경우, 비례 피드백 게인값이 크면 일반적으로 불안정하게 된다. 대부분의 시스템에서는 적절히 감소된 안정한 응답을 얻기 위하여 비례 피드백 게인에 관한 상한값이 있다. 그리고 이 한계는 허용하기 힘든 정상상태 오차를 가져올 수도 있다. 매우 큰 비례게인을 첨가하지 않고 제어의 정상상태 정확도를 향상시킬 수 있는 한 방법은 다음의 적분제어를 도입하는 것이다.

적분제어를 사용하는 이유는 일정한 정상상태

오차를 제거 또는 줄이기 위한 것이다. 그러나 이러한 이점은 전형적으로 과도 응답을 나쁘게 하는 대가를 치르게 된다. 적분 피드백은 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$u(t) = \frac{K}{T_i} \int_{t_0}^t e dr_1$$

그러므로 $D(s)$ 는 다음과 같이 된다.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = D(s) = \frac{K}{T_i s}$$

여기서 T_i 는 적분시간 또는 리셋(reset)시간이라고 하며 응답속도의 척도의 $1/T_i$ 는 리셋률(reset rate)이라고 한다. T_i 는 단위입력이 주어졌을 때 적분기의 출력이 $1K$ 가 되는데 걸리는 시간이다. 이 피드백은 오차신호 입력 e 가 없더라도 어떤 유한한 제어신호를 만들 수 있는 주요한 특성을 갖는다. 적분 제어의 특징은 일정한 외란 w 를 제거하기 위한 제어를 수행할 때 오차 값이 아주 작아서 비례제어로는 더 이상 유한한 입력을 만들지 못하는 경우에도 누적 에러로 인해 외란 w 는 조절이 가능하다는 의미이다. 다시 말하자면, 적분기 $D(s)$ 는 $s=0$ (주기가 무한대인 입력, 즉 일정한 외란)일 때 무한히 큰 게인을 가지게 된다는 의미이며 이것은 일정한 외란 w 에 대한 y 응답을 0으로 만든다. 비례 및 적분 제어를 함께 사용하는 경우, 제어입력 u 는 다음과 같다.

$$u = K \left\{ r - y + \frac{1}{T_i} \int_0^y (r - y) dt \right\}$$

여기서 K 는 비례게인(proportional gain)이라고 한다. 이 입력에 대한 2차 시스템의 운동방정식은

$$(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) Y(s) = A U(s) + B W(s)$$

$$U(s) = K \{ R(s) - Y(s) \} + \frac{R(s) - Y(s)}{s}$$

이므로

$$(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) Y(s) = A \left\{ K \{ R(s) - Y(s) \} + \frac{K \{ R(s) - Y(s) \}}{s} \right\} + B W(s) \text{이다.}$$

정리하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \{ (\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) s + AKs + \frac{AK}{T_i} \} Y(s) \\ & = A \left(Ks + \frac{K}{T_i} \right) R(s) + B_s W(s) \end{aligned}$$

외란의 입력은 미분의 형태로 주어지고 있으므로 일정한 외란에 대해서는 정상상태($t \rightarrow \infty$ 또는 $s \rightarrow 0$)에서의 영향이 없다. 이 식의 특성 방정식은

$$(\tau_1 \tau_2 s^3 + (\tau_1 + \tau_2) s^2 + (1 + AS) s + \frac{AK}{T_i}) = 0$$

이므로

설계자는 K 와 T_i 를 선정함으로써 s 의 계수와 상수항에 대한 값들을 독립적으로 결정할 수 있다. 따라서 특성방정식에 있는 세 개의 항 중에서 두 개를 독립적으로 조정할 수 있게 되어 더 좋은 과도 응답을 얻을 수 있다.

미분 피드백(혹은 변화율 피드백)은 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$u(t) = K T_d \dot{e}, \quad D(s) = K T_d s$$

그리고 T_d 는 미분시간(derivative time)이라고 한다. 이는 비례 혹은 적분 피드백과 함께 사용하여 감쇠를 크게하여 과잉응답(overshoot)을 줄이고 시스템의 안정도를 개선시킨다. 미분제어에서는 보정이 오차의 변화율에 따라 좌우되어 결과적으로 미분제어를 포함하는 제어기는 선행하는 응답을 보여준다.

비례-적분-미분(PID) 제어는 앞에서 설명한 세 가지의 제어방법들을 조합하여 구현할 수 있다. 여기서 제어신호는 오차, 오차의 시간적분, 그리고 오차의 시간 변화율의 선형결합으로 만들어진다. 이러한 PID 조합은 만족할 만한 정도로 오차를 감소시킬 수 있고 동시에 만족할 만한 안정도와 감소를 줄 수 있다. PID제어기는 매우

효과적이어서 본 연구에서와 같이 환경시험장치의 온도제어에서는 표준적인 제어 방식이다. 특히 하루동안의 온도 변화나 연간 온도의 변화추이를 짧은 시간에 시뮬레이션할 경우에는 동적 시스템의 추적(tracking)문제이므로 정상상태에서의 에러를 조정(regulation)하는 적분제어보다는 변화율의 기울기를 잘 쫓아가도록 하는 미분제어가 훨씬 중요한 역할을 한다.

2.2 추종 제어 로직

2.2.1 봄, 여름, 가을의 기후에 대한 EC의 Control Flow Chart

(DX를 사용하지 않고 실험하는 경우)

봄, 여름, 가을철에서 하루동안의 온도는 대체로 영상의 기온이므로 DX를 사용하지 않고 Brine cooler와 Brine heater만으로 온도제어가 가능하다.

- ① 먼저, PID제어의 게인 설정과 제어하고자 하는 온도변화를 시간에 따라 나타내고 이를 Set Point Program으로 작성한다.
- ② 실내 기후 실험동의 온도를 SPP의 초기온도로 맞춘다.
- ③ 실험동의 온도가 설정온도보다 높으면 PID게인에 따라 Brine cooler의 밸브를 조금 열고 Brine heater의 밸브는 조금 닫는다. 이렇게 하므로써 실험동의 온도는 떨어지게 된다.
- ④ 만일, 실험동의 온도가 설정온도보다 낮으면 역시 PID게인에 따라 Brine cooler의 밸브를 조금 닫고 Brine heater의 밸브는 조금 열게 된다. 이렇게 하므로써 실험동의 온도는 올라가게 된다.
- ⑤ 온도제어가 끝날 때까지 ③번과 ④번의 작업을 반복하게 된다.

2.2.2 겨울철 기후에 대한 EC의 Control Flow Chart (I)

(DX를 계속 가동하여 실험하는 경우)

겨울철에서 하루동안의 온도는 영하의 기온 위주로 온도제어를 해야 하므로 DX를 계속 가동하고 Brine cooler와 Brine heater를 동시에 사용하면서 온도제어.

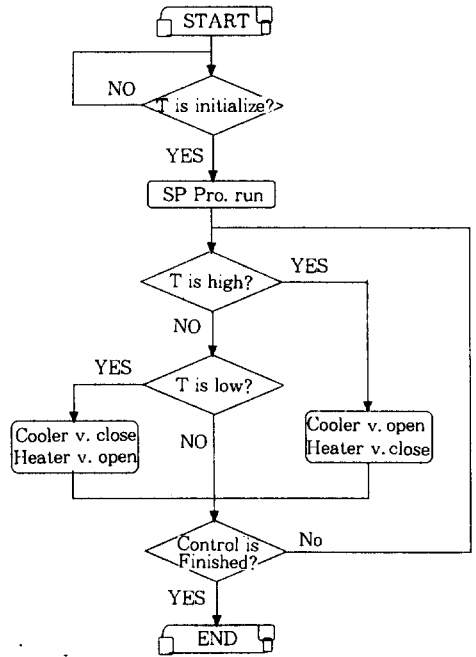


그림 3 봄, 여름, 가을의 기후에 대한 EC의 Control flow chart

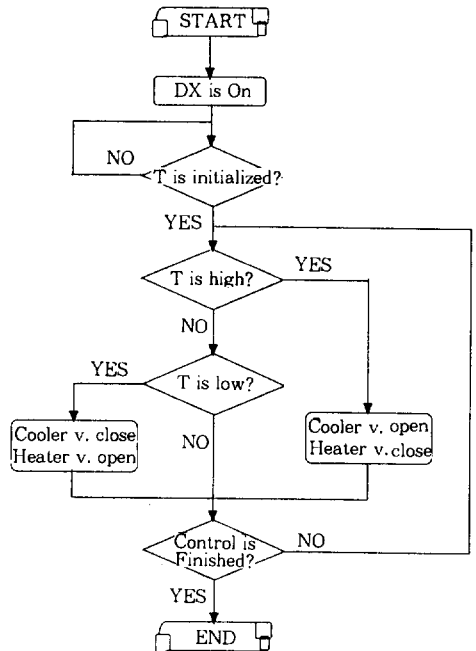


그림 4 겨울철 기후에 대한 EC의 Control flow chart(I)

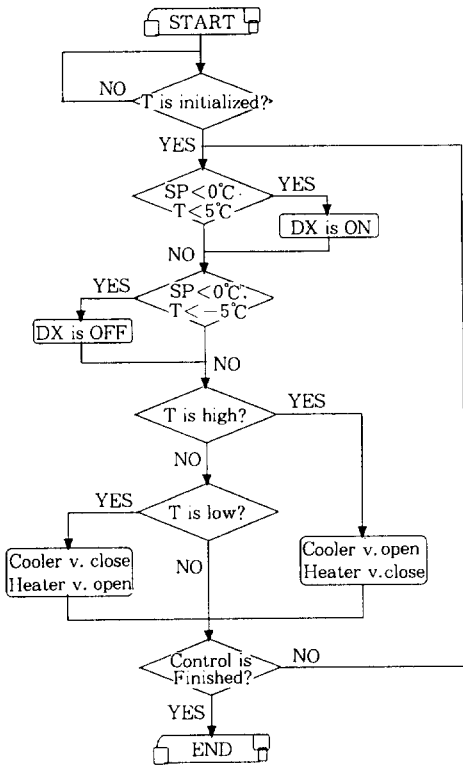


그림 5 겨울철 기후에 대한 EC의 Control flow chart(II)

- ① 먼저, PID제어의 게인 설정과 제어하고자 하는 온도변화를 시간에 따라 나타내고 이를 Set Point Program으로 작성한다.
- ② DX를 ON한다.
- ③ 환경 실험동의 온도를 SPP의 초기온도로 맞춘다.
- ④ 그 다음에는 DX를 사용하지 않았을 때와 마찬가지로 실험동의 온도를 제어한다.

2.2.3. 겨울철 기후에 대한 EC의 Control Flow Chart(II)

(온도 하강시에는 5°C에서 DX를 ON하고 온도 상승시에는 -5°C에서 DX를 OFF하는 경우)

DX를 계속 틀어 놓고 실험하는 경우 영상의 온도제어에 대해서도 DX와 Brine heater를 사용하여 온도를 데우는 것은 에너지의 낭비가 심하므로 영상의 온도에서는 DX를 사용하지 않는

온도제어.

- ① 먼저, PID제어의 게인 설정과 제어하고자 하는 온도변화를 시간에 따라 나타내고 이를 Set Point Program으로 작성한다.
- ② 환경실험동의 온돌 SPP의 초기온도를 맞춘다.
- ③ 설정온도가 0°C이하이고 현재의 온도가 5°C이하이면 DX를 ON한다.
- ④ 설정온도가 0°C이상이고 현재의 온도가 -5°C이상이면 DX를 OFF한다.
- ⑤ 그 다음에는 DX를 사용하지 않았을 때와 마찬가지로 실험동의 온도를 제어한다.

3. 제어 실험

본 실험에서는 Modular Automation System 과 S9000 Controller를 사용하여 추종 온도제어를 수행하였다. PID(비례-적분-미분)제어에서는 시스템의 분석을 통하여 원하는 성능을 가져다 주는 PID제어에서의 적절한 게인값을 찾아내는 것이 중요하다. 실험적으로 PID게인을 찾아내는 방법은 먼저 P게인 값을 점점 증가시키면서 P게인 만으로 원하는 응답을 충분히 잘 쫓아가도록 만든 다음 과잉응답(overshoot)이 생기게 되면 K게인을 조금씩 늘리면서 과잉응답을 줄여 나간다. 또한 정상상태에서의 오차가 존재하면 I게인을 통하여 이러한 정상상태에서의 오차를 줄인다. 본 제어기는 PID게인에 대하여 설정되는 의미가 조금 다르게 되어 있으므로 부연 설명하면 다음과 같다. 비례 제어에서는 비례게인(proportion gain)이 기존의 제어기와 같은 의미를 가지며 최소값이 0.1에서 1000까지 가능하나 미분제어에서는 미분게인의 값이 아니라 온도변화율을 계산하기 위해 사용하는 온도변화에 대한 단위시간(0.1미분제어 사용 않음, 또는 0.1~10min)을 입력받고 적분제어에서는 에러를 적분하기 위한 적분시간(0.02~50min)을 입력받는다. 결국 원하는 출력이 시간에 따라 변하는 Ramp함수와 같은 추적제어에서는 측정시간이 길어지면 변화량이 크게되고 따라서 미분제어의 게인을 크게하는 효과와 결국은 동일하다.

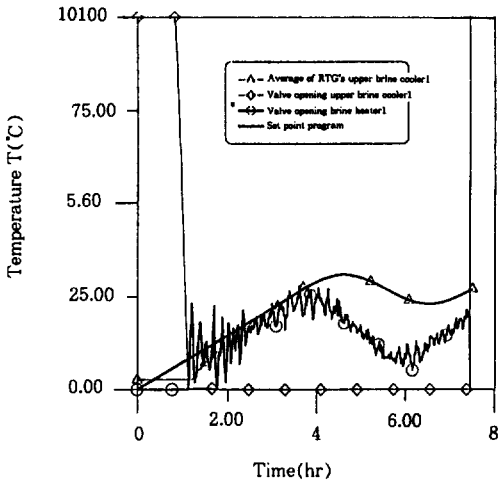


그림 6 Temperature tracking for summer

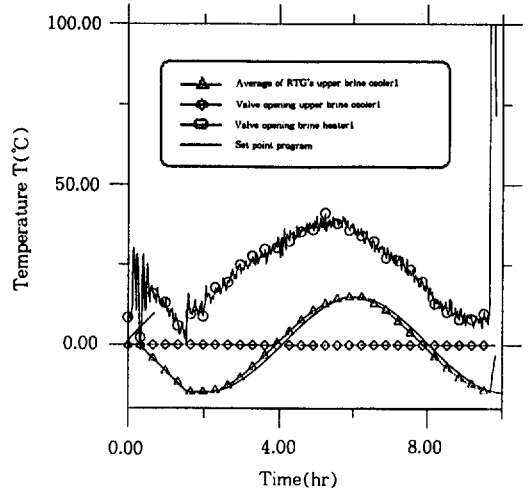


그림 7 Temperature tracking for winter

마찬가지로 적분제어에서도 에러를 더하는 적분 시간이 길어지면 에러의 적분값이 증가하여 이 값이 제어입력을 결정하는데 큰 영향을 미치게 된다. 봄, 겨울에 대한 추종제어 실험결과는 그림 6과 그림 7에 보여져 있다.

4. 맺음말

본문에서는 여러가지 열원 형태를 가지고 있는 외장형 공기조화기를 사용한 대형 환경 chamber에서 일간 기후 변화를 실내에 재현하기 위한 추종 제어 방식에 대한 이론적 배경과 실험에 대해 기술하였다. PID방식으로 추종제어를 수행할 경우에는 D값, 즉 미분제어가 시스템 특성 안정

에 필수적이며 가열 냉각 능력간의 balance유지가 제어 로직에서 중요한 인자가 된다. On/Off로 제어되는 D/X 냉동기가 가동되면 큰 량의 냉각능력이 갑자기 시스템내로 들어오게 되므로 이런 경우에는 On/Off 온도사이에 적당한 band를 두어 시스템 특성이 완만하게 변화할 수 있도록 해 주어야 한다. D/X 열 교환기와 전기 히터만으로 구성된 보통의 소형 환경 chamber에서는 제어가 쉬운 반면 전기소모가 큰 특징을 가지고 있으나 다양한 열원을 가진 대형 환경 Chamber에서는 제어로직은 다소 복잡하지만 에너지 절약적으로 온도 추종 제어를 수행할 수 있는 장점이 있다.