

실내환경조절설비의 제어시스템 특성에 관한 시뮬레이션

Simulation on the characteristics of the control system of an environmental control facility

이 종 석*
J. S. Lee

Key words : Environmental control facility(실내환경조절설비), Control system(제어시스템), Simulation(시뮬레이션), Digital controller(디지털 콘트롤러), Controlled variable(제어량), Manipulated variable(조작량)

Abstract

Environmental control facilities are used to simulate an environment or combination of environments under which many kinds of research and tests can be performed. The design of the control system to maintain desired environmental conditions is essential to proper operation of the facility. A simulation model of the facility has been developed by analyzing each component of the system thermodynamically with necessary properties and heat transfer relations. Using the system simulation model, the required characteristics of the control system has been investigated. PI controller is considered as the most probable controller for this kind of the facility, and electric heater power is shown as the proper manipulated variable for temperature control.

1. 서 론

열시스템에 대해 연구하거나 시험하기 위해서 일정한 실내환경조건을 유지해 줄 필요가 있다. 환경조절설비는 여러 종류의 연구와 시험이 수행될 수 있도록 온도와 습도 등의 환경을 인위적으로 만들어 주는 데 사용되는데, 공조장치와 실내공간으로 이루어진다. 공조기는 냉방, 난방, 제습, 가습 등의 기능을 제공함으로써 시험중인 열기구의 효과를 상쇄하며, 실내공간은 공조기에 의해 조성된

환경이 유지되는 공간으로서 시험대상기기가 놓이게 된다.

환경조절설비가 제기능을 잘 발휘하기 위해서는 설비의 설계와 공조기의 선택 외에, 요구되는 환경조건을 유지시키기 위한 제어시스템의 설계가 또한 매우 중요하다. Shavit와 Brandt⁽¹⁾는 PI 콘트롤러를 이용한 공기배출시스템에 대해 연구했는데, 최적 게인(gain)의 결정은 경험, 해석, 실험에 근거를 두어야 한다고 강조했다. 그들이 사용한 제어기는 아날로그 콘트롤러였는데, 점차로 디지털 컴퓨터가 이들을 대체하고 있다.

* 강릉대학교 공과대학 정밀기계공학과

원래, Direct Digital Control(DDC)이란 용어

는 D-A 변환기와 E-P 변환기를 사용하지 않고 컴퓨터의 디지털 출력으로부터 직접 제어대상기기를 움직이는 시스템에 대해 사용되었지만, 지금은 DDC란 단순히 디지털 컴퓨터를 이용한 프로그램이 가능한 제어를 의미하고 있다. May 등⁽²⁾은 디지털-공압(D-P) 변환기를 이용해 DDC를 공압밸브의 제어에 적용하였다. Nesler와 Stoecker⁽³⁾는 배출공기의 온도제어에 DDC를 이용하였으며, 비례계인과 적분계인의 선택에 대해 연구하였다.

Thompson과 Chen⁽⁴⁾은 실내공간과 제어시스템이 에너지소비에 미치는 영향을 조사하기 위해서, 수학적 모델을 개발하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 실내공간, 공조기, 제어시스템 등이 에너지 소비에 미치는 영향을 자세히 관찰하였다. 본 연구에서는 그들이 사용한 것과 비슷한 과정으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 환경조절설비에 적합한 제어시스템을 모색해 보고자 한다.

2. 환경조절설비의 개요

Fig.1은 환경조절설비에서 가장 핵심적인 공조기(Air Handling Unit)의 구성요소를 보여주는데, 필터, 두 개의 냉수코일, 전기히터, 팬, 가습기와 덕트로 이루어진다.

환경조절설비의 운전과 제어를 위해서는 적당한 계측이 이루어져야 한다. 계측의 목적은 제어와 에너지 유출입률의 계산이다. 적당한 제어기에 의해 환경조건이 일정하게 유지될 때 시험대상기기의 열유출입률은 공조기에 의해 가해지거나 제거되는 에너지의 비율로부터 결정될 수 있다.

공조기의 냉수코일에 의해 제거되는 에너지를 계산하기 위해서는 냉수의 유출입온도와 유량을 측정해야 한다. 전기히터에 의한 에너지 공급률을 알기 위해서는 전력을 측정하여야 하며, 또한 가습기에서의 증기분사율도 알아야 하지만 그것을 직접 측정하기는 어렵다. 대신에 증기분사율은 응축기에서의 응축률과 같다고 간주하며, 이는 절대습도차와 공기유량으로부터 계산할 수 있다. 실내와 주위사이의 열 흐름을 산정하기 위해서는 외기온도, 실내온도 그리고 다른 방의 온도를 측정해야 한다. 이러한 측정은 순간적인 에너지율이기 때문

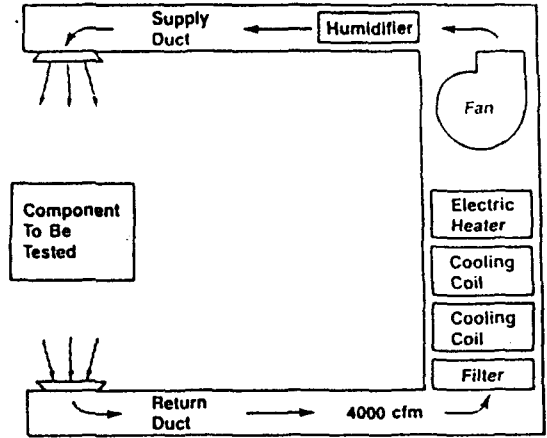


Fig.1 Diagram of the air handling unit

에 에너지양을 계산하기 위해서는 측정량들을 시간에 대해 적분하여야 하며, 그러기 위해서는 정밀한 자료획득시스템도 필수적으로 갖추어야 한다.

3. 시스템 시뮬레이션 모델

환경조절설비와 제어시스템을 설계하기에 앞서 시스템 시뮬레이션 모델이 먼저 세워져야 한다. 시스템을 구성하는 개개의 요소들에 대해 적당한 검사체적을 잡아 질량과 에너지의 보존 법칙을 적용하고 필요한 상태량과 열전달 관계식을 이용하여 시스템 시뮬레이션 모델을 개발하였으며⁽⁵⁾, 다음과 같은 가정들을 사용하였다.

- 운동에너지와 위치에너지는 무시할 수 있다.
- 유동조건은 모든 단면적에서 균일하다.
- 습증기는 이상기체로 간주한다.

각각의 검사체적에 대해 다음 식들이 사용되었다.

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

$$\frac{dU_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_e h_e \quad (2)$$

여기서 m은 질량, U는 내부에너지, Q는 열, W는 일, h는 엔탈피를 나타내며, i와 e는 입구와 출구를 의미한다.

식 (1)과 (2)를 시스템을 구성하는 모든 요소에

대하여 적용하면 시스템 시뮬레이션 모델의 지배방정식이 얻어지는데, 이들은 산술식 또는 일계 상미분방정식으로서 연립으로 동시에 풀어야 한다.

한편, 공기와 물의 엔탈피와 내부에너지, 습증기의 성질 등을 산정해야 하는데, 물과 공기의 열물리적 성질은 운전조건 범위 내에서 일정한 것으로 간주할 수 있다. 또한 지배방정식에 등장하는 열전달률은 열전달계수와 온도차로 표현되며, 냉수코일에 대한 열전달계수는 적당한 대류열전달 경험식과 기하학적 고려에 의해 산출한다.

또한, 공기조화장치의 모델링과 더불어 실내공간에 대한 모델링도 이루어져야 하며, 자세한 내용은 참고문헌^(5,6)에서 찾아볼 수 있다. 이렇게 해서 개발된 시스템 시뮬레이션 모델은 제어시스템의 설계와 성능 해석에 사용된다.

4. 제어시스템의 개요

4.1 디지털 제어(digital control) 개념

오늘날 공조냉동분야의 제어에는 컴퓨터를 이용한 디지털 제어가 널리 채용되고 있다. Fig.2는 전형적인 디지털 제어시스템의 예로서, 냉수유량을 조절함으로써 온도를 제어하는 시스템을 보여준다.

온도는 열전대에 의해 측정되며, 아날로그 전압은 아날로그-디지털 변환기(A-D converter)에 의해 디지털 전기신호로 바뀐다. 이 신호는 디지털 컴퓨터에 입력되며 적절한 제어 프로그램에 의해

제어신호가 출력되는데, 이때 자료획득시스템은 필요한 데이터를 기록한다. 디지털 출력신호는 다시 아날로그 신호로 바뀌어 전기-공압 변환기(electro-pneumatic transducer)에 의해 공압으로 바뀌어 공압밸브를 작동하게 된다. 밸브는 냉수유량을 조절함으로써 결과적으로 온도를 제어하게 되는데, 이와 같은 피드백(feedback) 제어시스템에 의하여 설정한 온도가 유지된다.

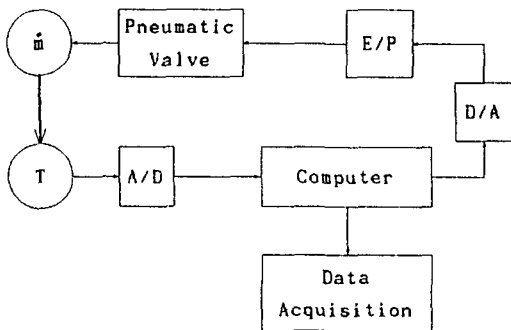
디지털 제어시스템의 장점은 제어 알고리즘이 소프트웨어적이란 점이다. 따라서 하드웨어를 교체할 필요가 없이 콘트롤 프로그램에 개인값만 변화시켜 줌으로써 P, PI, PID 등의 제어 알고리즘을 적용할 수 있다.

4.2 제어 전략(control strategy)

조절되어야 하는 환경조건들은 온도와 습도이며, 이들을 제어하기 위해서는 냉수코일의 유량, 전기히터로의 전력, 그리고 증기분사율을 조절해야 한다. 따라서, 이와 같은 제어시스템은 다변수입력-다변수출력(MIMO) 시스템이다. MIMO 시스템은 단변수입력-단변수출력(SISO) 시스템보다 복잡하기 때문에 가능하다면 SISO 제어전략을 이용하는 편이 낫다. 이렇게 하기 위해서는 제어 과정에서의 교호작용(interaction)의 정도를 분석해 볼 필요가 있다. 만일 교호작용이 작다면 SISO 제어전략을 각각의 회로(loop)에 적용할 수 있다. Relative gain method를 이용하여 교호작용을 조사한 결과⁽⁵⁾, 두 시스템은 서로 연관되어 있지만 그 정도는 작으므로 SISO 제어전략을 사용할 수 있다고 보여진다. 따라서 온도제어와 습도제어는 별도로 고려된다. 한편, 두 개의 relative gain 행렬을 비교해 보면 온도제어를 위해서는 전기히터 전력이 냉수유량보다 더 나은 조작량이라는 것을 알 수 있다.

4.3 디지털 콘트롤러(digital controller)

환경조절설비는 0.36초 간격으로 지배방정식들을 적분함으로써 모사되는 반면 디지털 콘트롤러는 3.6초의 샘플링 타임을 갖도록 시뮬레이션이 이루어진다. 어떤 종류의 제어기라도 Brandt와 Shavit⁽⁷⁾가 제시한 PID식을 이용하여 나타낼 수 있다. 연



\dot{m} : Chilled water flow rate
 T : Dry bulb temperature of the room

Fig.2 Diagram of a typical control system

속 제어시스템에 대한 PID식은

$$O = M + K_P \cdot E + K_I \cdot \int E dt + K_D \cdot \frac{dE}{dt} \quad (3)$$

여기서 O는 제어기의 출력, M은 제어기 출력의 오프셋(offset), E는 설정치와 측정치의 오차, 그리고 K_P , K_I , K_D 는 각각 비례, 적분, 미분계인을 의미한다. 오차 E는 온도 또는 습도의 설정치와 측정치의 차이를 말하며, 출력 O는 냉수유량, 히터 전력 또는 증기분사율의 조절량이 된다.

이 PID식을 디지털 컨트롤러에 이용하기 위해서는 이산화시켜야 한다. 적분항은 합으로, 미분항은 현재와 이전 시간에서의 오차의 차이를 샘플링 타임(t_s)으로 나누어 근사시키면 다음과 같이 된다.

$$O_i = M + K_P \cdot E_i + K_I \cdot \sum E_i \cdot t_s + K_D \cdot \frac{(E_i - E_{i-1})}{t_s} \quad (4)$$

여기서 i 는 시간 i 에서의 값을 의미하며, \sum 는 시간 0으로부터 i 까지의 합을 의미한다.

이 식은 각각의 계인값을 정해주면 어떠한 종류의 제어기에도 이용될 수 있다. 즉, 적분 제어기는 비례계인과 미분계인의 값을 0으로 놓으면 된다. 제어기의 설계를 위해 냉방능력이 3 냉동톤인 열펌프를 시험기기로 선정했다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

5.1 시뮬레이션 방법

각각의 제어기에 적당한 계인값을 정하기 위해, 두 가지 종류의 시뮬레이션이 수행되었다. 첫째는 설정치의 스텝변화이고 둘째는 시험기에서 발생 또는 필요로 하는 열률의 스텝변화이다. 열펌프 시험의 표준 운전조건을 초기 정상상태로 선정하였는데, 냉방시험은 80°F이고 난방시험은 70°F이다. 설정치 온도의 스텝변화는 10°F로 했으며, 시험기 열률의 스텝변화는 시스템에 대한 외란으로 모사되었다. 시뮬레이션의 초기조건은 설정치에서 정상상태의 운전이 이루어지도록 지배방정식을 풀어 서 얻어졌다.

5.2 제어기(controller)의 비교

냉방시험 시뮬레이션에 있어서 설정치 온도를 80°F의 정상 운전조건에서 90°F로 스텝변화를 시킴으로써 비례(P), 적분(I), 비례-적분(PI), 비례-미분

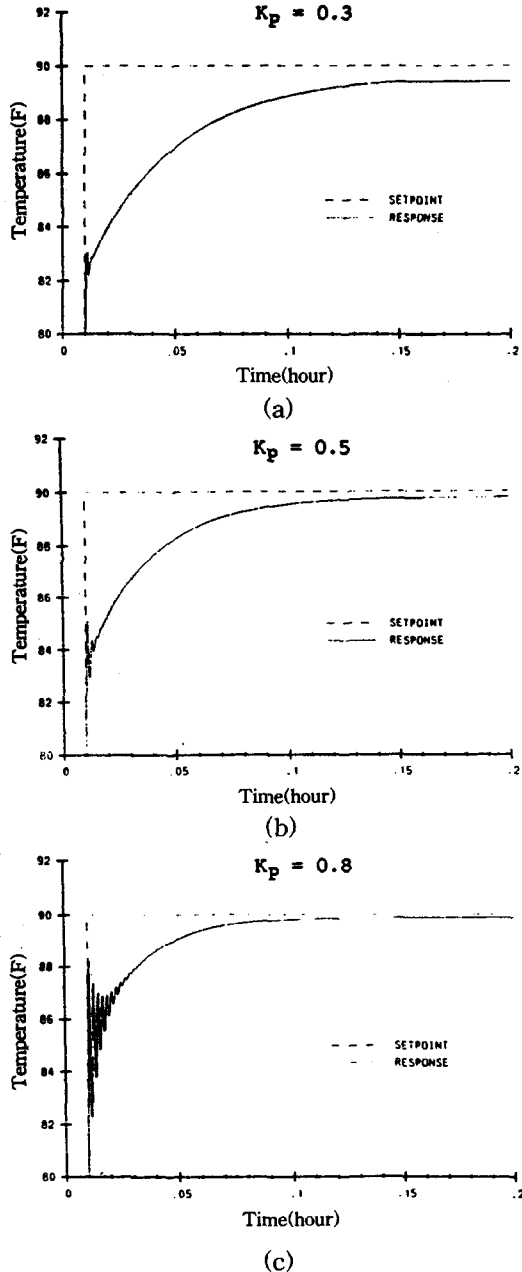


Fig.3 Responses of the proportional controller

(PD) 그리고 비례-적분-미분(PID) 제어기의 반응을 비교하였다.

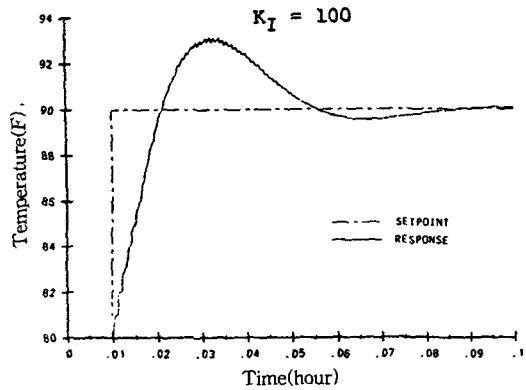
Fig.3은 계인값을 변화시킬 때의 비례 제어기에 의한 반응을 나타낸다. 그림 (a)는 계인값이 비교적 작을 때의 반응으로 대체로 느리고, 정상상태 오차를 수반한다. 계인값이 증가함에 따라 그림 (b)에서 보는 바와 같이 반응이 빨라지고 정상상태 오차도 줄어든다. 하지만, 계인값이 너무 커지면 그림 (c)에서와 같이 진동(oscillation)이 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 적절한 비례계인의 값은 작은 정상상태 오차와 진동을 수반한 빠른 반응의 절충에 의해 결정되어야 한다.

Fig.4는 적분 제어기에 의한 반응을 보여주는데, 정상상태 오차가 없어지며 시스템의 반응은 비례 제어기에 비해 빠르다. 그림 (a)에서와 같이 계인이 작을 때는 초과량(overshoot)이 크고 정상상태에 도달하는 시간이 길며, 계인을 크게 함에 따라 그림 (b)와 (c)에서와 같이 반응은 빨라지지만 진동이 심해지며, 그 이상으로 계인이 커지면 반응이 불안정해지게 된다.

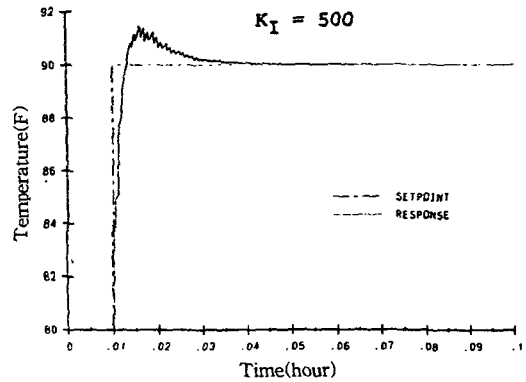
비례-적분 제어기는 K_p 와 K_i 의 값을 둘 다 지정해줌으로써 묘사할 수 있는데, Fig.5는 이들 값의 변화에 따른 PI 제어기의 반응을 나타낸다. 그림 (a)는 $K_p=0.5$ 와 $K_i=500$ 일 때의 반응 결과로서, 비례-적분 제어기에 있어서 최적에 가까운 상태를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 반응속도가 빠르고 정상상태 오차도 없다. 그렇지만, 각각의 계인값이 과도하게 되면 그림 (b)와 (c)에서 보는 바와 같이 진동이 발생하여 시스템의 반응이 불안정해질 수도 있다. 따라서 설계 시스템에서는 이러한 진동이 발생하지 않도록 주의해야 한다.

미분(D) 제어기는 자체만으로는 사용되지 않으며, 다른 종류의 제어기와 함께 사용된다. 비례-미분 제어기는 미분계인이 작을 때는 비례 제어기의 경우와 비교해서 별다른 차이를 보이지 않으나, 미분계인이 커지면 시스템의 반응은 진동이 심하거나 불안정하게 된다.

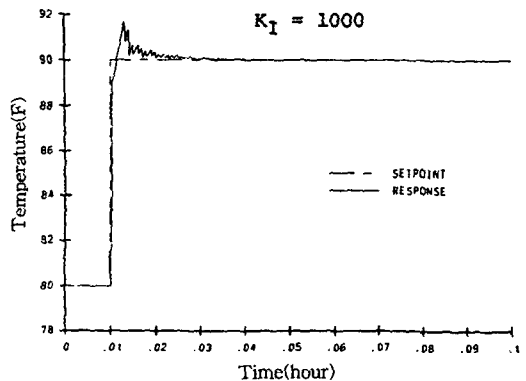
끝으로, PID 제어기는 PI 제어기에 미분계인을 더함으로써 얻어지는데, Fig.6은 K_D 의 값을 변화시켰을 때의 반응결과를 나타낸다. 각각의 경우에 있어서 $K_p=0.5$ 로 이전과 같고, $K_i=700$ 으로 증가



(a)



(b)



(c)

Fig.4 Responses of the integral controller

시켰다. PI 제어기의 반응 결과(Fig.5(a))와 비교하면, PID 제어기의 반응(Fig.6(a))이 약간 빠르고 초과량도 줄어든 것을 볼 수 있다. 이것은 미분항

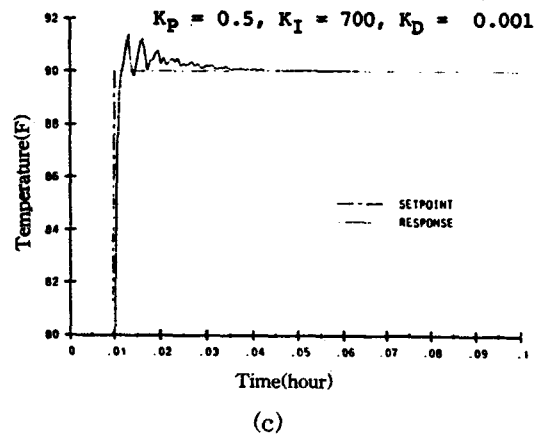
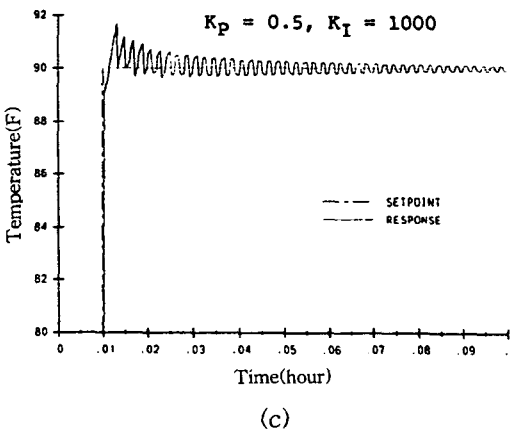
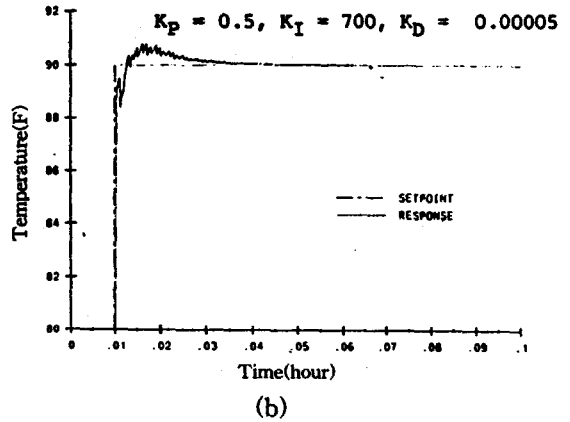
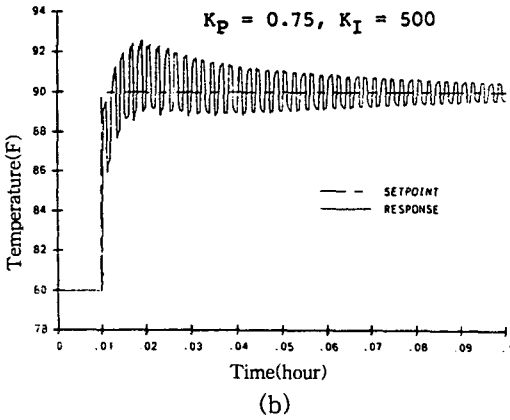
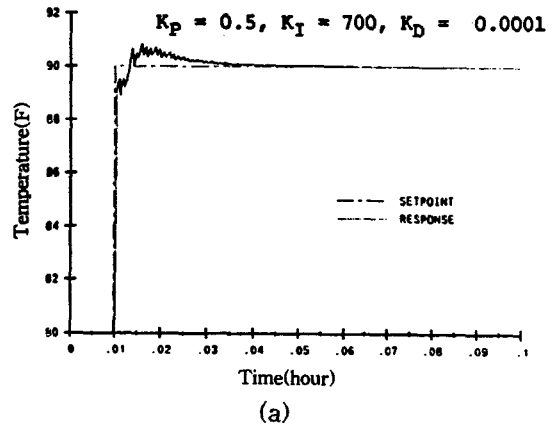
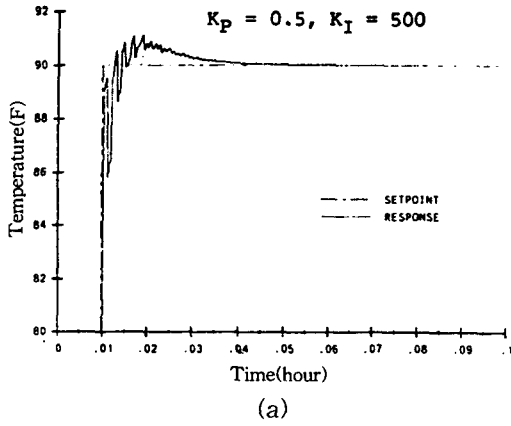


Fig.5 Responses of the PI controller

Fig.6 Responses of the PID controller

이 감쇠기(damper)의 역할을 하게 되므로 적분계인의 값을 크게 할 수 있기 때문이다. 그렇지만, 이러한 개선은 PID 제어를 PI 제어기보다 더

매력적으로 만들 정도는 아니다.

그림 (b)와 (c)는 미분계인을 각각 작고 크게 했을 때의 반응 결과로서, 작게 했을 때는 별로 차

이가 없는 반면, 크게 했을 때는 진동이 심해지는 것을 볼 수 있다. Brandt와 Shavit⁽⁷⁾에 의하면 디지털 콘트롤러에서의 미분항의 계산은 센서의 잡음에 민감하다. 본 연구의 단순화를 위해서 무시된 센서의 잡음이 실제로는 무시할 만큼 작지 않을 수도 있다. 이것이 PI 제어기가 선호되는 또 하나의 이유이다.

5.3 부하 변화에 대한 반응

냉방부하에 큰 스텝변화를 줌으로써 제어기의 성능을 시험해 볼 수 있다. Fig.7(a)와 (b)는 냉방 부하를 36,000Btu/h에서 26,000Btu/h로 변화시킬 때, 각각 적절히 조정된 비례(P), 적분(I) 제어기의 반응을 보여준다. 온도의 설정치를 변화시킨 경우에 비해 비례게인값이 조금 커졌다. 비례 제어기는 8분만에 정상상태에 도달하며 설정치 온도와는 5°F이상의 오차를 보인다. 반면에, 적분 제어기는 3분만에 정상상태에 도달하며 오차는 없다.

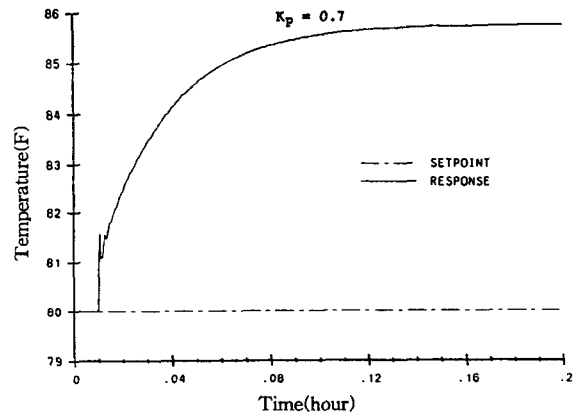
PI 제어기와 PID 제어기의 반응 결과는 적분 제어기의 경우와 비슷하며, 두 경우 모두 2분만에 설정치에 도달하며 정상상태 오차는 없다. PID 제어기는 PI 제어기에 비해 약간의 감쇠효과를 보이는 하지만 그 효과는 그리 크지 않다. 미분항이 센서 특성에 민감해질 수 있는 점을 고려할 때 불안정성의 위험을 감수하고 PID 제어를 사용하는 것은 그리 유익한 것이 아니라고 보여진다.

이상과 같은 냉방시험 시뮬레이션의 결과들을 종합해 보면 잘 선정된 게인값을 갖는 PI 제어기가 환경조절설비에 가장 적절한 제어기라고 보여진다.

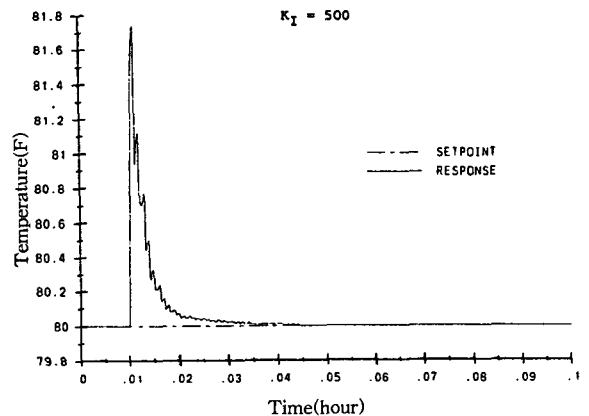
5.4 조작량(manipulated variable)의 비교

난방시험에 있어서 공조기는 시험기에서 발생한 열을 제거해 주어야 하는데 냉수코일이 이 역할을 한다. 온도를 일정하게 유지하기 위해서 적당한 제어기에 의해 코일에 흐르는 냉수유량을 조절하면 된다. 또는, 이렇게 하는 대신에 공기를 설정치보다 낮은 온도로 냉각한 후에 전기히터로 재가열함으로써 온도를 제어할 수도 있다. 일반적으로 유량보다는 전력이 조절하기 쉬운데, 이는 유량조절에 있어서는 전기-공압 변환기와 히스테리시스(hysteresis)를 수반하는 밸브가 필요하기 때문이

다. 또한 냉각 및 재가열 방법은 습도제어도 쉽게 해줄 수 있는데, 이는 냉수유량이 일정하기 때문에 정상상태의 응축이 예상되기 때문이다. PI 제어기에 의해 이 두 가지 방법을 비교한 결과가 Fig.8에 나타나 있다. Fig.8(a)와 (b)는 각각 냉수유량과 전기히터 전력을 조작량으로 사용했을 때 설정치의 스텝변화에 대한 시스템의 반응을 나타낸다. 두 가지의 반응결과를 비교해 보면, 재가열을 동반한 냉각방법이 냉수유량만을 조절하는 경우보다 좀 더 빠르게 반응하는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 전기히터가 냉수코일보다 더 빠르게 조절될 것이라는 직관을 확인시켜 주는 것이지만, 히터



(a) Proportional controller



(b) Integral controller

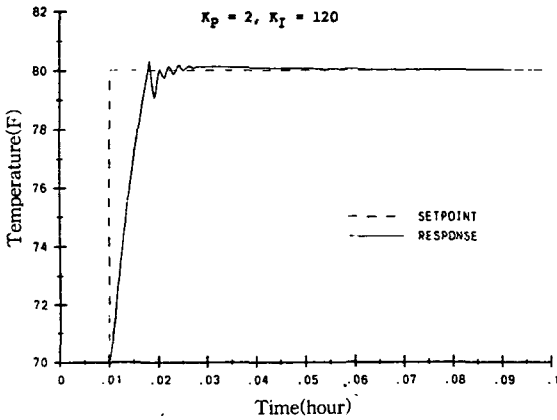
Fig.7 Responses to step change in cooling load

자체의 동특성을 무시한 결과임을 유의해야 한다.

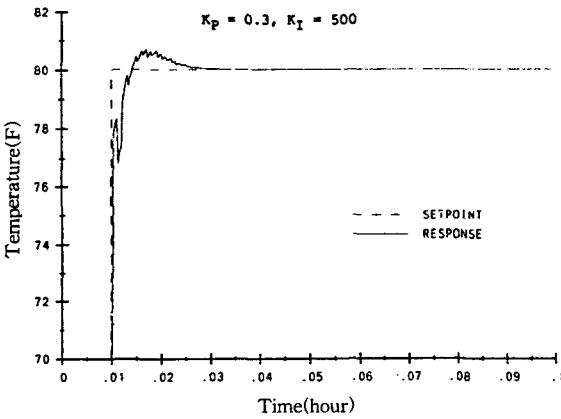
5.5 습도제어와 교호작용(interaction)

앞에서 온도제어는 습도가 완벽하게 제어된다는 가정하에서 이루어졌다. 이제, 습도 제어기는 잘 선정된 온도 제어기를 이용하여 설계되도록 한다. 절대습도(humidity ratio)를 습도제어의 제어량으로 사용한다. 냉방시험에 있어서의 표준 운전조건은 건구온도 80°F, 습구온도 67°F인데 이때의 절대습도는 0.011 lbw/lba이다. 습도 제어기의 설계를 위해 절대습도의 설정치를 0.011에서 0.015로

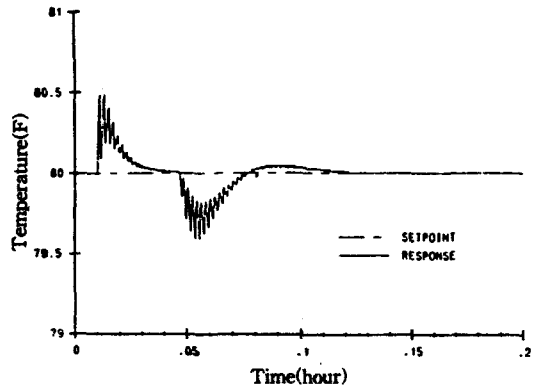
스텝변화시켜 보았다. 온도제어에서와 같이 PI 제어기가 가장 좋은 반응을 나타냈으며, 습도는 온도에 비해 더 긴 시간이 걸려야 정상상태에 도달하



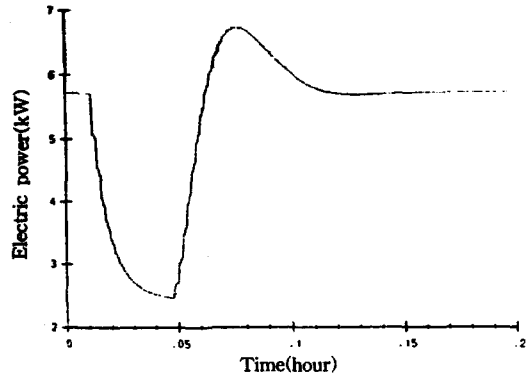
(a) Water flow rate(cooling only)



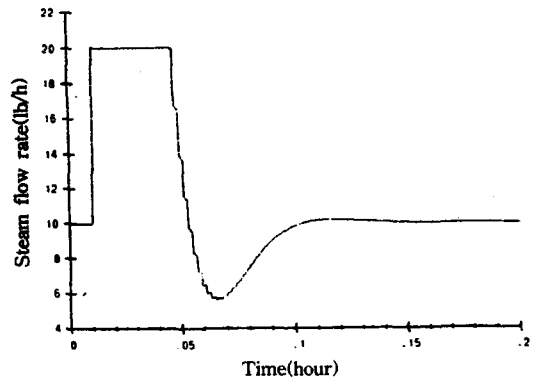
(b) Electric heater power(cooling and reheating)



(a) Temperature response(with PI controller)



(b) Electric heater power



(c) Steam flow rate

Fig.8 Responses of PI controllers using different manipulated variables in heating test

Fig.9 Interactions between temperature control and humidity control

는 것으로 나타난다.

습도 제어를 설계하는 데 있어서, 온도 설정치는 변하지 않았다. 하지만 실내공간의 공기온도는 온도와 습도의 상관관계(coupling)에 의해 습도제어의 영향을 받게 된다. Fig.9(a)는 습도 설정치의 변화에 의해 영향을 받는 온도의 변화를 나타낸다. 증기가 분사됨에 따라 온도는 처음에는 올라간다. 온도 제어기는 설정 온도를 유지하기 위해 Fig.9(b)에서 보는 바와 같이 전기히터의 전력을 줄인다. 그러면 온도는 곧 설정치로 되돌아간다. 절대습도가 설정치를 초과하면, 증기분사율은 Fig.9(c)에서 보는 바와 같이 줄어들기 시작하고 동시에 온도가 감소하게 된다. 그러면 온도 제어기가 전기히터의 전력을 증가시켜서 실내공간의 공기온도는 설정치로 유지된다.

온도와 습도의 제어에는 교호작용이 존재하기는 하지만, 각각의 제어를 독립적으로 설계하더라도 온도와 습도는 비교적 작은 공차(0.5°F) 이내에서 잘 제어된다고 보여진다. 따라서, 본 연구에서 사용된 SISO 제어전략은 적합한 것으로 볼 수 있다.

6. 결 론

환경조절설비의 제어시스템에 대해 연구하기 위해 시스템 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 이를 위해 설비의 각 구성요소들을 열역학적으로 해석하였으며 필요한 상태량과 열전달 관계식들이 이용되었다.

제어시스템의 설계에는 직접 디지털 제어 개념을 이용하였으며 제어량과 조작량, 그리고 제어전략에 대해 기술하였다. 본 연구에서 개발된 시스템 시뮬레이션 모델을 이용해서 전형적인 운전조건 하에서 여러 제어기들의 반응을 모사하였다. 시뮬레이션 결과에 의해 제어기들의 특성을 비교하였으며 제어전략의 타당성도 검토하였다.

결론적으로, 여러 종류의 제어기 중에서 PI 제어기가 환경조절설비에 가장 적합하며, 온도제어에 있어서는 전기히터 전력이 가장 적합한 조작량으로 보여진다. 또한 온도와 습도의 제어는 큰 오차 없이 독립적으로 이루어질 수 있는 것으로 여겨진다.

본 연구의 목적은 여러 제어기와 시뮬레이션 결과를 비교해 봄으로써 환경조절설비에 적합한 제어방법과 제어기의 종류를 결정하기 위한 것이었다. 실제의 설비에 최적한 제어기를 선정하기 위해서는 제어시스템을 이루는 요소들의 동적인 특성들을 모두 고려하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Shavit, G. and Brandt, S. G., 1982, "The dynamic performance of a discharge air-temperature system with a P-I controller", ASHRAE Transactions Vol. 88, Part 2, pp. 826~838.
2. May, W. B., Borresen, B. A., and Hurley, C. W., 1982, "Direct digital control of a pneumatically actuated air handling unit", ASHRAE Transactions Vol 88, Part 2, pp. 857~874.
3. Nesler, C. G. and Stoecker, W. F., 1984, "Selecting the proportional and integral constants in the direct digital control of discharge air temperature", ASHRAE Transactions Vol. 90, Part 2B, pp. 834~845.
4. Thompson, J. G. and Chen, P. N. T., 1979, "Digital simulation of the effect of room and control system dynamics on energy consumption", ASHRAE Transactions Vol. 85, Part 2, pp. 222~237.
5. Lee, J. S., 1987, Design and Analysis of an Environmental Control Facility, M.S. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
6. 이종석, "환경조절설비의 설계와 모델링", 공기조화 냉동공학회, 97년도 하계학술발표회 논문집 (I), pp. 150~155.
7. Brandt, S. G. and Shavit, G., 1984, "Simulation of the PID algorithm for direct digital control applications", Proceedings of Workshop on HVAC Controls Modeling and Simulation. Atlanta, Ga.