

## 가변 풍량 유닛에 대한 적분기를 가진 상태 제환 제어에 관한 연구

박 세 화\*

### A Study on the State Feedback with Integral Control for a Variable Air Volume Unit

Se-Hwa Park\*

**요약** 건물의 에너지 효율과 절약은 위해 최근 주목을 많이 받고 있는 가변 풍량 유닛(VAV)에 대해 실제적인 적용을 위한 적분기를 가진 상태 제환 제어를 연구한다. 디지털 제어기에 적합하도록 제어기를 개발하게 되니, 디지털 제어기는 결과적으로 대상으로 하는 실내 공간의 온도와 급기 유량으로부터 VAV 유닛 댐퍼의 개도율 조절한다. 설정 온도의 변화와 외부 온도의 변화 등의 조건에 대해 모의 실험이 수행되었으며, 단순화된 대상 실내 공간과 댐퍼 구동기의 모델링이 고려되어 제어기의 이득 파라미터와 시스템의 동특성과의 관계를 고찰한다.

**Abstract** State feedback with integral control for a variable air volume(VAV) unit which is recently taken notice of for the energy efficiency and saving in the building is studied to investigate the performance of the digital control methodology for the possible practical application. The digital controller which acquires the target zone temperature and the air flow rate of the supplied air to the zone controls the opening of the damper in the VAV unit. Simulation results are performed for the conditions including reference changes and external thermal variations. In the simulation, simplified conditioned zone and the damper actuator modelling is considered, and relationships between controller gain parameters and the system dynamics are investigated.

**Key Words :** Variable air volume, State feedback, Damper opening control, Actuator model

#### 1. 서 론

건물의 공조(空調) 시스템은 쾌적한 실내 환경유지를 위해 중요한 역할을 하고 있는 바, 냉난방시 적절한 실내 온도를 유지시킬 뿐만 아니라 외부의 신선한 공기도 공급해주는 기능을 갖는다. 이런 공조시스템은 상호 연결된 전기·기계적인 시스템과 열역학적 특성을 가지는 많은 설비들의 결합으로 구성되어 있다. 공조시스템 내에서 냉난방된 공기는 덕트를 거쳐서 가변 풍량 유닛(VAV)[1]을 통해 실내(zone 혹은 room)로 공급된다. VAV 유닛은 냉방 시에 시스템으로부터 보내오는 차가운 공기의 양을 조절함으로써 실내온도를 적정 선으로 유지하도록 하고 난방 시에 실내온도를 조절해주시기도 한다. 따라서, VAV 유닛을 최적상태로 제어함으로써 필요 이상의 냉난방 공기의 공급을 억제하는 등 에너지 절감이 가능하다.

VAV유닛의 제어기는 보통 건물자동화 시스템의 지

령(command)에 따라 정해진 온도를 유지하게 된다[5~7]. 이 때 적절한 실내 온도를 유지시키기 위해서 기존에는 고전적인 PID (Proportional, integral and derivative) 제어기를 주로 사용하고 있다. 고전적인 제어방법인 캐스케이드 PI 방식을 VAV 유닛 제어에 적용했을 시의 제어 성능 및 여러 이득의 변화에 따른 동특성 변화에 대한 연구도 있지만[8], 이런 PI 제어법 기반으로 한 제어방법은 제어기 이득의 결정 시에 경험적인 판단에 의해 정하는 등 체계적인 제어기 설계가 이루어지지 못하므로, 실내 열부하 변동에 따라 동작 조건이 달라지면 전체적인 제어 특성이 나빠지기도 한다. 또한, 기본적으로 대상시스템에 대한 모델을 기반으로 제어기를 설계 한 것이 아니기 때문에 좀 더 제어 성능을 개선하고 최신의 디지털 제어 기법 적용이 가능하도록 VAV 유닛과 실내공간에 대한 상태공간 모델을 개발하기도 한다[9]. 선형화된 상태 공간 모델을 대상으로 하여 상태 제환 제어를 적용하기도 하는데, 일정한 이득인 상태 제환 제어는 일반적으로 제어 입력이 없는 레귤레이터 시스템에만 유용하다. 설정치를 추종해야

\*한국생산기술연구원 생활산업기술개발센터 의료반도체 기술연구원

본 논문은 1999년도 에너지절약기술개발 자금의 지원을 받아 한일 MEC(주)와 공동개발하였으며, 그 핵심 내용은 가변풍량유닛의 디지털 제어 방법에 관한 것이다. 이는 공조시스템의 제어에서 에너지절감이 기대되는 신제품개발기술이다. (Tel: 041-639-8467)

하는 보통의 시스템에서는 원치 않는 잠음과 그 시스템이 제어하거나 억제시켜야 할 외란이 존재하기 마련이므로 통상적인 형태의 고정 이득을 갖는 상태 궤환 제어만으로는 추종 성능을 보장할 수 없다. 이런 문제에 대한 대안으로서 적분 기능을 갖는 상태 궤환 제어가 고려될 수 있겠다. 따라서, 본 논문에서는 VAV 유닛과 실내 공간 모델을 바탕으로 최근에 많이 응용되고 있는 제어 기법 중의 하나인 적분기를 갖는 상태 궤환 제어 방법[10]을 이용하여 VAV 유닛용 제어기를 설계하고자 한다. 그리고, 여러 동작 조건에 대해 모의 실험을 하고 그 성능을 분석한다.

## 2. 가변 풍량 유닛

공기를 매개로 하여 공간의 온도를 유지하는 방법에는 기본적으로 두 가지 방법이 있는데 그 하나는 실내 열부하의 변동에 따라 송풍 온도를 변화시키고 송풍량을 일정하게 유지하는 방법 즉 CAV(Constant Air Volume, 정풍량) 방식이고 다른 하나는 송풍량을 변화시키고 송풍온도를 일정하게 유지하는 방법, 즉 VAV 공조 방식이다. 최근 들어서는 VAV 방식에 많은 관심이 고조되고 있으며, CAV 방식은 부하가 거의 일정한 경우에 주로 사용된다.

공조시스템의 응용 형태가 다양하고 복잡적이므로 VAV 유닛도 다양한 형태를 취할 수 있으나, 기본적으로 다음과 같은 3 종류로 나뉘어진다.

- ① 바이패스형(bypass type) : 이 형태는 부하가 적을 경우 잉여 공기를 천장 속이나 환기 덕트로 바이패스 시키고 '취출 풍량을 감소시키는 방법으로, 급기 송풍기는 항상 일정한 송풍량으로 운전된다. 즉, 실내 온도 조절기에 의하여 조작되는 댐퍼 모터에 의하여 바이패스 댐퍼의 개도를 변화시켜 실내로 보내는 풍량을 변화시킨다.
- ② 교축형(throttle type) : 실내의 열부하 감소에 대응하여 급기 송풍량을 줄여 가는 방식으로 급기 송풍기의 풍량 및 압력이 변화한다. 이 유닛은 여러 가지 구조의 것이 제작되고 있으며, 실내 온도 조절기에 의하여 벨로우즈 내의 공기압력을 변화시켜 벨로우즈의 팽창에 의하여 공기의 유로를 죄어서 풍량을 조절한다.
- ③ 유인형(induction type) : 저온의 고압 1차 공기로 고온의 실내공기를 유인하여, 부하에 대응하는 혼합비로 바꾸어서 송풍온도를 공급하는 방식이다.

이외에도 다양한 형태가 있을 수 있는데, 본 연구에서는 Figure 1과 같은 형태의 VAV 유닛을 대상으로 하였

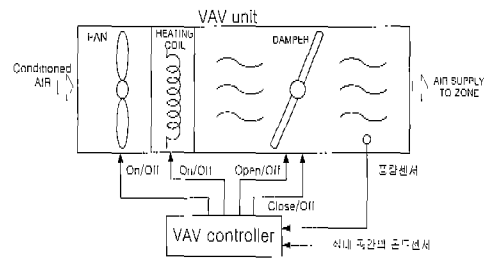


Figure 1. 대상으로 하는 VAV 유닛 및 제어기.

다. 이런 형태의 VAV 유닛은 보통 건물 자동화 시스템의 통제를 받는 DDC (direct digital controller)를 통해 제어가 이루어진다. 본 논문에서 고려한 VAV 제어용 DDC는 실내공간의 온도와 댐퍼를 지나서 나오는 공기 유량 측정 센서 값을 입력으로 하고 설정 조건에 따라 연산 처리 후에 4개의 디지털 ON/OFF 출력값을 내보내게 된다. 댐퍼는 모터에 의해 구동되어 제어신호에 따라 열리거나 닫히는 방향으로 동작된다. 팬과 가열 코일은 특정 조건하에서 조작자가 ON/OFF하도록 결정되어 있으며, 여기서는 댐퍼의 열고 닫음을 결정해주는 제어입력용 디지털 신호를 어떻게 결정해줄지나가 주관심사이다. 제어기에서 어떤 조건에 따라 댐퍼를 열도록 디지털 신호를 주면(ON) 인속직으로 댐퍼는 완전히 열릴 때까지 열리는 방향으로 움직이게 되며, 비슷하게 닫히는 신호를 인가하면(ON) 댐퍼는 반대 방향으로 움직여 닫히게 된다. 만일 두 신호 모두 인가되지 않으면 댐퍼는 현재의 위치에 그대로 있게 된다. 이와 같은 구조의 VAV 유닛은 아주 단순하기에 매우 실제적인 형태라고 할 수 있다. 따라서, 이런 형태의 VAV 유닛과 설정한 온도의 유지가 요구되는 실내공간을 대상으로 제어기를 설계한다.

## 3. VAV 유닛 시스템의 모델링

VAV 유닛 제어기 설계를 위한 실내 공간의 열동특성을 살펴보면, 건물의 실내 공간은 복잡한 열전달 시스템이기 때문에 완전한 해석적 모델링을 하기는 매우 어려울 뿐만 아니라 미 실제적이다. 따라서, 실내의 공간을 어떤 외부 조건과 접촉되어 있는 형태의 단순화된 열전달 시스템으로 보는 것이 합당하며, 제어기 개발에 이용하기 위해서는 실제적인 물리적 특성을 반영하면서 단순화할 필요가 있다. 이런 단순화된 열시스템(thermal system)은 다음 식에 의해 표현된다[11].

$$MC \frac{dT}{dt} = (UA)(T_o - T) - \rho c V(T - T_s) \text{ 여기서, } + Q_e \quad (1)$$

- $T$  : 공간의 온도(°C)
- $t$  : 시간(sec)
- $MC$  : 벽체와 tapped air를 포함하는 엔클로저의 전체 열용량 (J/K)
- $(UA)$  : 전체의 트랜스미턴스-면적 인자(J/s · K)
- $\rho c$  : 공급 공기의 열용량(J/m<sup>3</sup>)
- $V$  : VAV 댐퍼에 의한 공급 공기 유량(m<sup>3</sup>/s)
- $Q_g$  : 외란
- $T_o$  : 외부온도(K)
- $T_s$  : 공급공기 온도(K)

위의 수식에서 오른쪽의 첫 번째 항은 건물벽을 통한 열의 습득이나 손실과 관련되는 항이다.  $UA$ 는 벽, 천장, 창문 등의 구조와 절연 물질에 따라서 적절히 결정된다. 두 번째 항은 VAV 유닛에 의해 공급되는 공기에 의해 실내의 온도 상승이나 감소와 관련된 부분이다. 세 번째 항은 여러 외란을 나타낸다. 즉, 해석적으로 결정될 수 없거나 모델을 단순화할 시에 제외시켰지만 온도의 동특성에 영향을 주는 값이다.

VAV제어기의 입력은 실내공간 온도인  $T$ 로부터 댐퍼의 조절을 위해 공급공기의 양을 조절하기 위해  $V$ 를 결정한다. 공급공기의 양을 결정하기 위해서 비율(0 ~ 100%)을 의미하는  $x$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$V = V_{\max}x, \quad 0 < x \leq 1 \quad (2)$$

여기서  $V_{\max}$ 는 단위시간당 공기의 최대공급량으로서  $x$ 가 0이면 댐퍼가 완전히 닫혀서 전혀 공기가 공급되지 않음을 의미하며,  $x$ 가 1이면 댐퍼가 완전히 열려서 최대의 공기가 공급됨을 나타낸다. 정상상태에서 댐퍼의 개도를 조절할 시에 댐퍼 전후의 공기압의 차이가 많이 나면 소음이 심하게 날 수 있으므로 댐퍼가 어느 이하로 닫히는 것을 막고 있다. 따라서,  $x$ 의 하한선은 0이 아닌 일정한 값으로 조정하여 운전도록 한다.

그리고, 보통 VAV 유닛의 댐퍼는 모터에 의해 구동되며, 구동전압의 방향에 따라 일정한 속도로 열리는 쪽으로 움직이거나 닫히는 쪽으로 움직인다. 실제로 댐퍼 조절용 모터는 일정한 구동 전압의 범위를 넘으면 회전하게 되나 데드존(dead zone)이 존재한다. 그러므로, 한 방향으로 회전시키기 위해서는 어느 이상 치의 구동 신호를 지속적으로 인가해야 한다. VAV 유닛 제어기는 앞에서 언급한대로 댐퍼의 위치를 정해주는 형태로 제어입력을 주게 되며, 설정되는 댐퍼의 위치 값에 따라 모터를 일정한 방향으로 회전시키게 되는데 이런 관계를 1

차의 동특성으로 다음과 같이 반영할 수 있겠다.

$$\dot{x} = -\tau x + \tau u \quad (3)$$

여기서,  $u$ 는 제어기에서 정해진 댐퍼의 위치를 나타내는 제어입력 값이며,  $\tau$ 는 댐퍼가 현재의 위치에서 다음 위치까지 옮겨가는 동특성 시정수이다. 이는 실내 온도의 시정수에 비해 상당히 적은 편이다. 그리고, 실제적으로 실내에 공급되는 공기량은 댐퍼의 기하학적인 관계에 의해 (4)식에 나타낸  $x_a$ 가 된다.

$$x_a = \sin\left(\frac{\pi}{2}x\right) \quad (4)$$

$x_a$ 는 0에서 1사이의 값이 된다. 결국 VAV 유닛 제어기에서 댐퍼의 위치 신호  $u$ 를 결정하면 위 식의 1차 특성으로 댐퍼의 개도가 정해지며, 식(4)에 의해 구동기와 풍량과의 관계가 정해져 이에 따른 풍량의 공기가 실내에 공급되는 것이다.

공급공기용 풍량의 간지기가 있는 경우 풍량의 동특성은  $\tau$ 에 비해 극히 작으므로 무시할 수 있다. 따라서, 풍량 센서를 설치하게 되면  $x_a$ 를 알 수 있게 된다.

위에서 언급한 내용을 종합하여 실내공간의 온도  $T$ 와 댐퍼의 위치( $x$ )를 상태변수로 놓고 각각  $x_1, x_2$ 로 정의하면 식(1)~(4)로부터 식(5)~(8)과 같이 정리될 수 있겠다.

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} = & -(UA - \rho c V_{\max} x_a) \frac{x_1}{MC} + \frac{UA}{MC} T_o \\ & + \rho c V_{\max} T_s \frac{x_a}{MC} + \frac{Q_g}{MC}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -\tau x_2 + \tau u, \quad (6)$$

$$x_a = \sin\left(\frac{\pi}{2} \text{sat}(x_2)\right), \quad (7)$$

$$\text{sat}(x_2) = \begin{cases} 1, & \text{if } x_2 > 1, \\ 0, & \text{if } x_2 < 0, \\ x_2, & o.w. \end{cases} \quad (8)$$

#### 4. VAV 유닛 제어를 위한 선형 모델링

대상으로 하는 시스템을 기술한 식(5)~(8)에서 볼 수 있듯이 이는 비선형 시스템이다. 이런 시스템에 대해서 상태제관 제어기를 설계하기 위해서는 선형화된 모델이 요구된다. 이를 선형화하기 위해서는 정상상태에서 동작하게 될 동작점을 찾아야만 되지만 대상으로 하는 시스템에서는 외란에 해당되는 부분의 영향이 크기 때문에 그것이 불가능하다. 따라서, 불확정성이 많이 존재

하지만, 일정한 온도와 일정한 제어입력을 동작점으로 가정하고 제어를 위한 선형화된 모델을 생각할 수 있겠다. 상태공간 선형 모델링을 간단히 얻기 위해서 구동기의 비선형성은 무시하면 다음과 같이 기술된 시스템을 얻을 수 있다.

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) + Fw_1, \quad (9)$$

여기서,  $X(t)$ 는 온도의 상태변수  $x_1(t)$ 와 공기유량의 상태변수  $x_2(t)$ 로 이루어진 벡터이며,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-UA - \rho c V_{\max} \bar{x}_a}{MC} & \frac{\rho c V_{\max} T_s}{MC} \\ 0 & -\tau \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \frac{\rho c V_{\max}}{MC} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \text{이고 } \bar{x}_a \text{는 댐퍼 개}$$

도의 동작점에 해당되는 상수로서 0.5(50%)로 정할 수 있으며,  $w_1$ 은 선형화할 때 제외된 값으로 시스템에 외란으로 작용된다.

그러면, VAV 유닛제어의 목적은 다음의 두 조건을 만족하도록 제어입력  $u(t)$ 를 찾는 것이라고 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{i) } \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_1(t) &= 0, \quad \text{그리고} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}_2(t) &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{ii) } \lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = \text{일정한 설정치 } r. \quad (11)$$

그리고 나서,  $w$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$w = \begin{pmatrix} w_1 \\ r \end{pmatrix}. \quad (12)$$

출력값  $c(t)$ 를

$$\begin{aligned} c(t) &= r - x_1(t) \text{로 하면} \\ c(t) &= [-1 \ 0]X(t) + [0 \ 1]w \\ &\equiv DX(t) + Hw. \end{aligned} \quad (13)$$

그러면, 조건 ii)는  $\lim_{t \rightarrow \infty} c(t) = 0$ 과 동등하다.

제어기를 상태변수와 출력값  $c(t)$ 의 적분값을 이용하여

$$\begin{aligned} u(t) &= -k_1 x_1(t) - k_2 x_2(t) - k_3 \int c(t) dt \\ &= -K_1 X(t) - K_2 \int c(t) dt \end{aligned} \quad (14)$$

로 정의하고,  $y(t) = \int c(t) dt$ 로 놓으면, 식(9), (12)와 (13)으로부터 폐회로 시스템(closed loop system)은 다음

과 같이 정리될 수 있겠다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(t) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} [K_1 \ K_2] \begin{bmatrix} X(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F \\ H \end{bmatrix} w,$$

이는 다시

$$\dot{\hat{X}}(t) = (\hat{A} - \hat{B}K)\hat{X}(t) + \hat{F}w. \quad (15)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \hat{X}(t) &= \begin{bmatrix} X(t) \\ y(t) \end{bmatrix}, \quad \hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ D & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \\ K &= [K_1 \ K_2], \quad \hat{F} = \begin{bmatrix} F \\ H \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (16)$$

식(15)는  $\hat{X}(t)$ 에 대한 상태 변환 형식이며, 폐회로 시스템의 pole을 적절히 배치하도록 이득  $K$ 를 설정하게 된다. 원하는 pole을 배치하기 위해 수치 시뮬레이션 툴인 MATLAB의 함수(acker( ) 또는 place( ))를 이용하여 손쉽게 이득  $K$ 를 결정할 수 있다.

## 5. 모의 실험 및 결과 고찰

### 5.1. 모의 실험 방법

식(16)의 시스템 파라미터로부터 폐회로 시스템의 pole을 원하는 위치에 배치하도록 세이 이득  $K$ 를 결정 한 뒤에 식(14)를 통해 제어 입력이 결정되나, 이는 시스템이 연속 시간 영역에 해당될 경우이다. 내상으로서 하는 VAV 유닛 시스템은 제어 입력이 댐퍼의 열고 닫음을 결정하는 디지털 ON/OFF의 형태로 공급이 된다. 이 때 결정되는 제어 입력 값은 원하는 댐퍼의 위치에 해당되는 값이므로 현재의 댐퍼 위치를 나타내는  $x_a$ 와의 차이로부터 댐퍼를 열 것인지 닫을 것인지가 정해지게 된다.

대상 시스템은 연속 시간 특성을 갖는 비선형 시스템으로서 적분기와 상태 변환 제어기가 결합된 전체 제어기의 구성도가 Figure 2에 나타나 있다. 디지털 제어 입력 신호는 한 샘플링 시간 동안에 댐퍼의 변화 정도를 알고 있으므로 그 변화량보다 크거나 작도록 제어입력이 설정될 필요가 있으면, 댐퍼를 열거나 닫도록 지령을 하고 그렇지 않으면 현재의 상태를 그대로 유지시키도록 하는 구조로 하였다. 따라서, Figure 2에서 볼 수 있는  $\delta$ 는 한 샘플링 시간 동안 댐퍼가 회전하는 한계치를 의미하며, 아래첨자  $k$ 는  $k$ 번째 단계들,  $r$ 은 온도 설정치를 의미한다.  $U_{k-1}$ 는 이전 단계의 제어 입력 값으로서

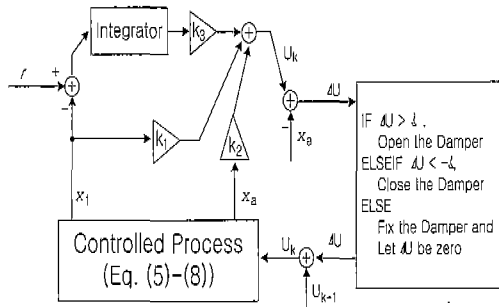


Figure 2. 전체 제어 시스템의 구성도 및 제어 방법.

메모리에 저장해 놓고 현재의 제어 입력 값 계산에서 이용된다. 연속시간 영역에서 기술된 대상 시스템의 상태는 식(5)~(8)로부터  $\dot{x}_1$ 과  $\dot{x}_2$ 를 Runge-Kutta 방법에 의해 적분하여 얻어낸다.

### 5.2. 대상 시스템 파라미터

설계된 제어기의 성능을 위해 대상으로 하는 실내공간은 벽이 콘크리트로 되어 있으며, 벽두께는 0.15m, 실내공간의 크기는 5 m×3 m×2.3 m이고, 두께는 0.02 m인 이중유리로 되어 있으면서 0.8 m×1.2 m인 창문이 두 개, 1.2 m×1.7 m인 창문이 한 개가 설치되어 있다고 하자[8]. 이러한 수치와  $\rho$ 는 1.225 Kg/m<sup>3</sup>이고,  $c$ 는 1005.4J/Kg·K를 이용하여 프로세스의 파라미터를 결정하면,  $MC$ 는  $4.249 \times 10^4$ J/K,  $UA$ 는 130.6J/s·K을 얻을 수 있다. 그리고,  $V_{max}$ 는 0.223 m<sup>3</sup>/s, 댐퍼를 최소에서 최대까지 변화되는데 소요되는 시간이 90초,  $T_o$ 를 30℃,  $T_s$ 를 18.0℃라고 하자.  $\tau$ 는 90초의 25%의 시간으로 하며,  $\delta$ 는 1/90, 디지털 제어기의 샘플링 시간을 15초로 하였다.

### 5.3. 모의 실험 및 고찰

실내의 초기 온도는 26℃에 대해 여러 조건하에서 모의 실험을 수행하였다. 설정 온도는 초기에 24℃로 하다가, 3000초 후에 25℃로 바꾸고, 6000초에 다시 24℃로 바꾸었다. 그리고, 통상적으로 디지털 ON/OFF 신호의 전환이 잦으면, 전류의 변화가 많이 생기므로 에너지 소모가 많이 될 수 있다. 모의 실험 시에 이런 디지털 제어 신호의 변경 횟수도 확인해보았다.

Figure 3은 폐회로 시스템의 pole이 [-0.04, -0.03, 0.02]가 되도록 제어기를 설계한 경우의 시스템의 특성을 나타낸 것이다. Figure에서 (a)는 온도 설정치와 실제 추종값, (b)는 유량의 설정치와 실제의 출력값, (c)는 온도의 오차 그리고 (d)는 댐퍼의 동작 상황을 나타낸 것으로 열림은 1로 닫힘은 -1, 멈춤은 0으로 나타

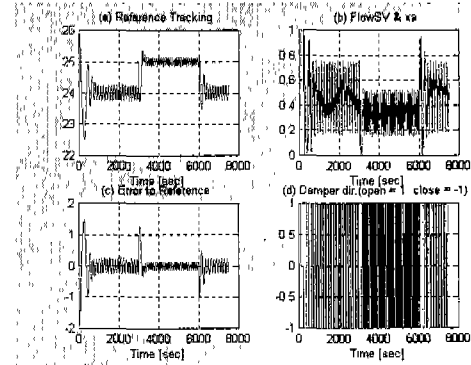


Figure 3. 모의 실험 결과(1) (폐회로 시스템의 pole이 [-0.04, -0.03, -0.02]에 위치).

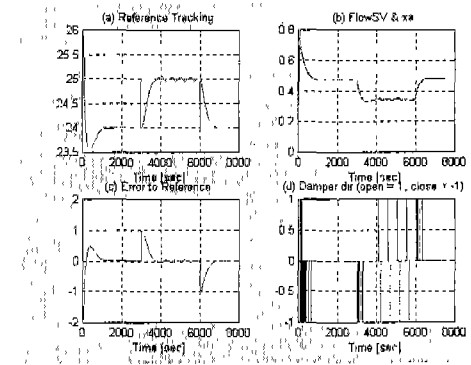


Figure 4. 모의 실험 결과(2) (폐회로 시스템의 pole을 [-0.02, -0.02, -0.01]에 위치, 일정한 외부온도조건).

내었다. Figure 3을 살펴보면, 설정치를 잘 따라가지만 수행시간동안 237회의 잦은 댐퍼의 전환을 볼 수 있다. 이렇게 민감하게 반응하는 것은 시스템의 pole을 s-영역에서 좌방면으로 많이 치우치도록 설정한 때문으로 분석된다. Figure 4는 폐회로 시스템의 pole을 [-0.02, -0.02, -0.01]로 정한 경우에 대한 동특성을 나타낸 것이다. 이 경우 댐퍼의 열고 닫음의 전환 횟수는 60회 밖에 안되어 Figure 3에 비해 훨씬 둔감하게 동작함을 볼 수 있다. Figure 4는 외부온도가 일정하게 작용하는 경우였으나, Figure 5에서  $T_o$ 가  $T_o = 30^\circ\text{C} + \sin(2\pi t/1000)[^\circ\text{C}]$ 으로 섭동이 생기도록 인가한 경우에 대한 동특성을 보여주고 있다. 이 경우 동특성에 외부온도 변화의 영향이 미침을 볼 수 있으며, 설정치를 유지하기 위해 댐퍼의 여닫음 전환도 좀 더 늘어나 128회로 변화하는 특성을 보여준다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 VAV 유닛 시스템을 효과적으로 제어

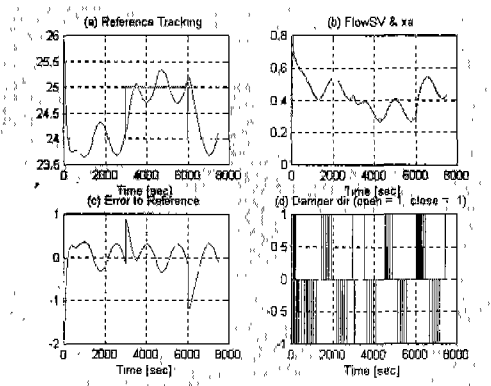


Figure 5. 모의 실험 결과(3) (폐회로 시스템의 pole을 [-0.02, -0.02, -0.01]에 위치, 외부온도 가변).

하기 위한 방법으로서 적분기를 가진 상태 궤환 제어기를 설계하고 여러 조건에 대해 모의 실험을 하였다. 과거에는 VAV 제어기로서 PI를 기반으로 한 형태의 제어기가 주로 적용되었으나, 본 연구에서는 상태공간 모델을 기초로 한 제어 방법을 적용하여 가능성을 볼 수 있어서 그 의미가 크다고 하겠다. 본 논문에서는 디지털 제어기로 구현하기에 적합한 형태로 제어기를 설계하였으므로, 실제적으로 활용성이 높다고 할 수 있다. 원래의 대상시스템은 미선형 시스템이나 제어기 설계 시에는 선형화된 모델을 가지고 제어기의 이득을 결정하는데, 이 때 폐회로 시스템의 pole을 어디에 위치하도록 제어기의 이득을 정해주느냐에 따라 시스템의 동특성이 많이 달라짐을 볼 수 있었다. 모의 실험에서 대상으로 하는 VAV 유닛 시스템은 실제적으로 많이 활용되는 형태이므로, 본 논문의 연구 결과는 실제 시스템에 대해 적용시 좋은 지침이 될 수 있겠다.

### 7. 후 기

본 논문은 에너지기술지원센터의 에너지기술개발사업

연구과제(중소규모 건물용 건물자동화시스템의 개발)의 위탁과제(건물 공조 시스템용 제어기 개발 및 신뢰성 향상 방안 연구) 연구 결과의 일부를 수록한 것입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Steve Y. S. Chen and S. J. Demster, "Variable Air Volume Systems for Environmental Quality", McGraw-Hill, 1996.
- [2] 최홍기, "VAV 시스템의 제어", 공기조화 냉동공학 회지, 제18권, 제4호, pp. 303-318, 1989.
- [3] 원영희, "VAV 시스템의 종류 및 제어 방안", 냉동 공조기술, pp. 41-49, 3월, 1997.
- [4] Herb Wendes, "Variable Air Volume manual", The Fairmont Press Inc., 1994
- [5] 한화택, "건물 자동화 시스템", 냉동공조기술, pp. 34-40, 1997.
- [6] 건물자동화를 위한 분산형 제어기의 개발, 한국생산기술연구원 생산기술연구사업 보고서, 1997.
- [7] 박세화, 전경석, "CAN을 이용한 분산형 제어기 개발 및 가변풍량 유닛에의 적용 연구", Journal of Industrial Technology, Vol.3, No.1, pp. 62-70, 1998.
- [8] 박세화, "가변 풍량 유닛의 캐스케이드 PI 제어에 관한 연구", Journal of Industrial Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 39-47, 2000.
- [9] 박세화, "가변 풍량 유닛 제어기를 위한 실내공간 열동특성의 단순화된 상태 공간 모델링", Journal of Industrial Technology, Vol.4, No.1, pp. 10-17, 1999.
- [10] B. Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice-Hall, Inc., 1982.
- [11] Z. Zhang and R.M. Nelson, "Parametric analysis of a building space conditioned by a VAV system", ASHARAE Transactions: Research, 3546, pp. 43-48, 1992.