

냉난방 시스템의 이중선형 시스템에 관한 제어기 설계

A Controller Design of the Bilinear System for HVAC(Heating, Ventilating and Air-conditioning) System

이정석¹, 강민수², 김명호³, 이기서⁴

Jung-Suk Lee, Min-Soo Kang, Myoung-Ho Kim, Key-Seo Lee

Keywords : HVAC(Heating, Ventilating and Air-Conditioning)(냉난방시스템),
Air Temperature Control(공기온도제어), Bilinear System(이중선형 시스템)

Abstract

In this paper, a HVAC controller which has a bilinear system is designed to control the air temperature in building room and a saving of energy on the HVAC system. For modeling of the HVAC bilinear system, AHU(Air Handling Unit) is modeled on the control of inside-outside air flow using three dampers in a duct. A heat exchanger and the single room are also modeled by the energy conservation law. Under the modeling of the HVAC bilinear system, the control's law of the bilinear HVAC system is derived by Lyapunov's non-linear theory and Deress's the linear feedback laws for bilinear system. In this paper it was proved that the controller of the HVAC bilinear system is able to control the air temperature with a disturbance in order to get a target of temperature in the building room by the computer simulation when the control inputs regulate the air flow rate and a capacity of the heat exchanger.

1. 서론

현재의 빌딩들은 프레온 가스식 냉방이나 연소식 보일러를 사용하여 냉난방을 하고 있으며, 인간은 이를 통하여 거주공간의 쾌적한 환경 및 에너지 절약을 현재보다 더 추구하고 있다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서는 인간이 느끼기에 적절한 공기온도를 공급할 수 있는 공기조화기와 제어기 설계가 중요하다.

국내 건물에 사용하고 있는 냉난방 시스템(Heating, Ventilating and Air-Conditioning)은 고전적인 제어기술을 사용하고 있어서, 미래에 인간

이 추구하고자 하는 냉난방 시스템에는 비효율적이고, 고 에너지 소비형이다. 즉, 이 냉난방 시스템의 제어기술은 온-오프(On-Off)형태의 디지털 직접제어(DDC: Digital Direct Control) 시스템이나 비례미분 적분제어를 사용하고 있다[2, 3].

따라서 진보된 냉난방 시스템을 갖추기 위해서는 우선적으로 크게 두 가지로 요약하여 볼 수 있는데, 하나는 공기조화기로서 효율적으로 공기 온도를 제어하기 위함이다. 즉, 많은 연구자(K-V Ling and A.L Dexter, 1994)들이 공기조화기의 비선형을 선형화하여 제어에 적용하였다. 다른 하나는 전체의 냉난방 시스템의 모델링을 선형화하여 다양한 제어방법을 적용하였다[1, 2]. 특히 Schumann이 공기난방 및 습도난방을 선형화하여 이산선형이차조절기(discrete linear quadratic regul-

¹ 정회원, 광운대학교 제어계측과 대학원, 박사과정

² 정회원, 광운대학교 제어계측과 대학원, 박사과정

³ 비회원, 경원전문대학 건축설비과, 부교수

⁴ 정회원, 광운대학교 제어계측과, 교수

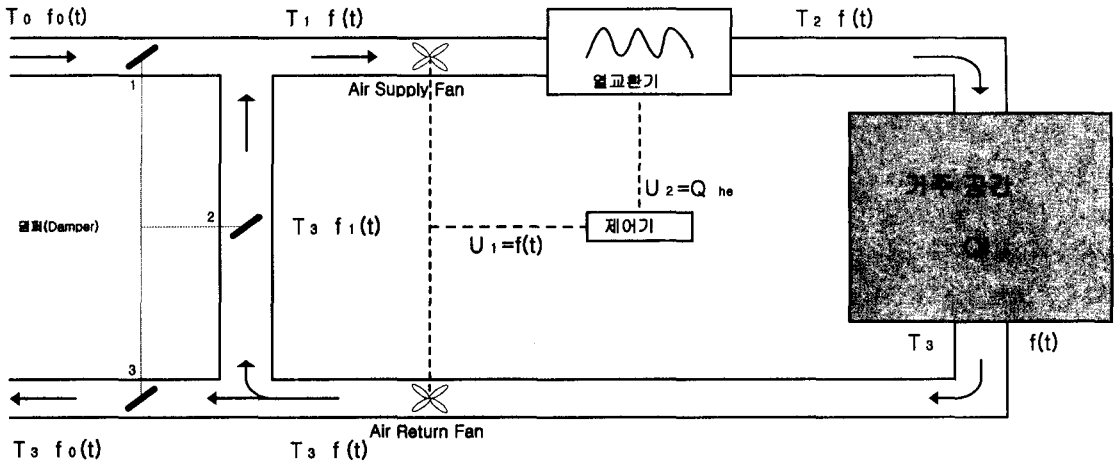


Fig. 1 냉난방 시스템 구성도

ator)로 두 개의 입력/출력을 제어하는데 많은 노력을 하였다. 그러나 이러한 많은 연구자가 냉난방 시스템을 선형화하여 제어법칙에 적용하였고, 이는 근본적인 모델링이 이중선형 시스템으로 제어를 수행하지 않았다.

따라서 본 논문은 이러한 냉난방 시스템의 모델링이 공기조화기(Air-Handling Unit), 열교환기와 거주공간으로 구성되어 있다고 볼 수 있으며, 이때 이 모델 방정식은 비선형인 이중선형 시스템(Bilinear System)을 Lyapunov의 비선형 제어이론을 바탕으로 제어를 설계하여 시뮬레이션을 통한 제어능력을 입증하고자 한다

따라서 본 논문은 냉난방 시스템이 내외부 공기조화기, 열교환기 및 거주공간 부분 구성으로서 모델링을 수행하여(2-1), 동력학적인 방정식으로 표현하였다(3.). 그리고 이 모델링의 상태 방정식이 시불변(Time Invariable)인 이중선형(Bilinear System)으로서 Lyapunov의 선형 안정화를 통하여 제어를 설계하였고, 또한 이 제어가 외부의 외란(Disturbance Rejection Law)에도 공기온도를 잘 제어할 수 있는 제어를 설계하였다(4.). 그리고 마지막으로 이러한 제어가 안정적으로 거주공간의 공기 온도를 정확히 제어하는지를 시뮬레이션(5.)을 통하여 입증하고자 한다.

2. 냉난방 시스템 모델링

2.1 냉난방 시스템의 모델

이 냉난방 시스템의 모델은 일반적인 형태로서 Fig. 1과 같이 거주공간을 중심으로 거주공간에 공기열량을 공급하는 열교환기, 그리고 내외부 공기를 공기 팬으로 조절하여 거주공간의 공기온도를 조절하는 변풍량(Variable Air Volume)의 공기조화기로 구성하여 한다.

우선적으로 이 냉난방 시스템의 공기흐름은 외부의 신선한 공기가 온도 T_0 와 공기흐름률(Air Flow Rate)이 f_0 를 갖고 덕트로 들어간다. 최초에 들어온 공기는 공기의 흐름을 조절하는 1번 댐퍼를 통과한 공기와 2번 댐퍼를 통과한 공기 온도 T_3 , 공기흐름률이 f_1 를 갖는 공기와 합쳐져서 공기공급 팬(Air Supply Fan)으로 이동하고, 그리고 합쳐진 공기는 온도 T_1 , 공기흐름률 f 를 갖고 공기공급 팬(Fan)을 통과한다. 이 때 이 공기공급 팬은 공기공급률은 일정하게 거주공간으로 공급할 수 있게 한다.

공기공급 팬을 통과한 공기는 공기의 열량을 공급하는 열교환기를 통과하여 온도 T_2 로 변화한다(이때 Q_{he} 는 온열일 때는 양, 냉열일 때는 음의 값을 갖는다). 그리고 열교환기에서 조절된 공

기온도 T_2 , 공기흐름률 f 를 갖는 공기는 거주공간으로 유입되고 거주공간에 유입된 공기는 거주공간의 부하를 갖고 원하고자 하는 공기온도에 따라 과도상태를 갖는다. 거주공간을 나온 공기는 거주공간의 부하에 따라 온도 T_3 와 공기흐름률 f 를 갖고 공기배출 팬으로 유입되고, 이 팬은 다시 한번 공기공급의 공기흐름률과 같은 변화로 배출한다. 공기배출 팬을 거친 공기는 일부는 외부로 배출되고, 나머지는 다시 재공급 덕트를 통하여 유입된다.

이러한 공기흐름의 상태로 냉난방 시스템은 구성되어 거주공간의 공기온도를 인간이 쾌적하게 느낄 수 있는 온도까지 변화한다. 그러나 본 논문은 공기온도의 변화에 영향을 미치는 습도에 대해서는 취급하지 않았다.

2.2 공기조화기의 모델링

간단한 에너지 균형의 법칙에 따라서 식 (1)과 같이 정상상태에서 동작한다고 가정하고, 이때 공기의 고유열 계수는 온도 변화에 비하여 매우 작다고 가정한다.

$$fC_aT_1 = f_0C_aT_0 + f_1C_aT_5 \quad (1)$$

위 식은 외부 공기온도와 내부에서 재순환되는 공기가 합쳐져서 다시 거주공간으로 유입된다. 즉 T_0 는 외부 공기온도, T_5 는 내부 재순환되는 공기온도이며, 다시 합쳐진 공기온도는 T_1 이 된다. 그리고 공기흐름률이 각각 f_0 , f_1 , 그리고 f 가 된다.

$$fC_aT_3 = f_1C_aT_5 + f_0C_aT_6 \quad (2)$$

식 (2)는 거주공간으로부터 나온 공기가 배출 공기 팬으로부터 나와서 다시 재순환되는 것으로서, T_3 및 f 는 공기배출 팬에서 나오는 공기온도 및 공기흐름률이 되고, T_4 및 f_0 는 외부로 배출되는 공기온도 및 공기흐름률이 되며, 그리고

T_5 및 f_1 은 재순환되는 공기온도 및 공기흐름률이 된다. 이때 외부로 배출되는 공기흐름률은 유입되는 외부 공기흐름률을 같게 댐퍼(Damper)를 조절한다. 따라서 재순환되는 지점에서의 공기의 온도 및 공기흐름률이 같고, 전체적인 공기조절식을 식 (3)과 같이 표현된다. 단, 배출되는 공기의 온도를 모두 같다고 가정하다.

$$fC_aT_1 = f_0C_aT_0 + fC_aT_3 - f_0C_aT_3 \quad (3)$$

공기흐름률 f_0 는 거주공간으로 들어가는 공기흐름률 f 를 초과할 수 없으며, 신선한 외부 공기가 25 %, 내부 재순환되는 공기의 양을 75 %로 정한다. 그리고 제어입력은 거주공간으로 들어가는 공기의 양을 조절하는 f 로 설정하였다.

2.3 열교환기와 거주공간의 모델링

이 시스템은 각각 열교환기와 거주공간을 에너지 보존 법칙에 따라 이끌어낸 식으로서 식 (4) 및 식 (5)와 같이 된다.

$$\rho C_p V_{he} \frac{dT_2}{dt} = f\rho C_p(T_1 - T_2) + Q_{he} \quad (4)$$

$$\rho C_p V_{hs} \frac{dT_3}{dt} = f\rho C_p(T_2 - T_3) + Q_{hs} \quad (5)$$

3. 거주공간의 동력학 방정식

공기공급 팬으로부터 나오는 공기온도는 식 (3)에서 T_1 을 식 (4)에 대입하여 전체의 냉난방 시스템에 관한 상태방정식은 아래와 같이 이끌어낼 수 있다.

$$T_2 = \frac{1}{V_{he}}(T_3 - T_2)f + \frac{f_0}{V_{he}}(T_0 - T_3) + \frac{1}{V_{he}\rho C_p}Q_{he} \quad (6)$$

$$T_3 = \frac{1}{V_{hs}}(T_2 - T_3)f + \frac{1}{V_{hs}\rho C_p}Q_{hs} \quad (7)$$

냉난방 시스템 계수의 정의는 Table (1)과 같다.

Table 1 냉난방 시스템 계수값

| C_p | constant pressure specific heat of air | J/Kg ' C |
|-----------|--|-------------|
| f | volumetric airflow rate | m^3/s |
| Q_{he} | heat input in the heat exchanger | W |
| Q_l | thermal load on the room | W |
| t | time | s |
| T_{rej} | desired thermal space temperature | $^{\circ}C$ |
| T_l | air temperature at location l | $^{\circ}C$ |
| V_{he} | effective heat exchanger volume | m^3 |
| V_{ts} | effective thermal space volume | m^3 |
| ρ | air density | Kg/m^3 |

식 (6) 및 식(7)의 상태방정식은 이중선형 방정식으로서 아래와 같은 가정을 하고자 한다.

- i) 열교환기는 열량을 공급하는 시스템으로 가정하고, 열교환기의 동력학적인 모델링은 취급하지 않았다.
- ii) 공기조화기(Air Handling Unit)는 완벽히 내외부 공기를 조절되며, 공기압력은 일정하다.
- iii) 냉난방 시스템의 장비 및 장치에 대해서 열손실은 전체 없다.

아래의 매개변수를 이용하여 상태방정식 (6) 및 (7)를 좀더 간단히 식 (8), (9) 및 (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$\alpha_1 = \frac{1}{V_{he}}, \quad \alpha_2 = \frac{f_0}{V_{he}}, \quad \gamma_1 = \frac{1}{V_{he} \rho C_p}$$

$$\beta_1 = \frac{1}{V_{ts}}, \quad \gamma_2 = \frac{1}{V_{ts} \rho C_p}$$

이때 입력값은 U_1 은 f , U_2 는 Q_{he} 이며, 상태값을 $x=[T_2 \ T_3]^T$ 으로 설정하고, 출력값 Y 를 T_3 로 한다.

$$\dot{x}_2 = \beta_1(x_1 - x_2)u_1 + \gamma_2 Q_l \tag{8}$$

$$\dot{x}_1 = \alpha_1(x_2 - x_1)u_1 + \alpha_2(T_0 - x_2) + \gamma_1 u_2 \tag{9}$$

$$y_1 = x_1, \quad y_2 = x_2 \tag{10}$$

주어진 위 식은 이중 선형방정식으로서 동작점 상태의 값을 X^e 라고 하면, 현 상태값과 동작 상태값의 차가 실제 동작하는 상태로 $\delta X = X - X^e$ 로 표현할 수 있고, 이에 대한 행렬 형태로 표시하면, 식 (11)과 같다.

$$\delta \dot{X} = A \delta X + \sum_{i=1}^2 \delta X_i B_i U + B_0 U + E V \tag{11}$$

$$Y = C \delta X$$

$$A = \begin{bmatrix} -\alpha_1 u_1^e & \alpha_1(u_1^e - f_0) \\ \beta_1 u_1^e & -\beta_1 u_1^e \end{bmatrix}$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} \alpha_1(x_2^e - x_1^e) & \gamma_1 \\ \beta_1(x_1^e - x_2^e) & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 0 \\ \beta_1 & 0 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ -\beta_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2 \end{bmatrix} \quad C = [0 \ 1]^T$$

행렬 E는 거주공간의 열량부하의 계수이다.

4. 이중선형 시스템의 궤환 제어기 설계

궤환제어기는 거주공간 및 덕트에 설치된 온도센

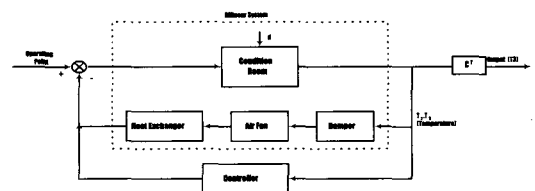


Fig 2. 제어신호 흐름도

서로부터 현재의 온도를 감지하여, 우선적으로 댐퍼를 조절하고 공기의 공급팬으로 공기의 량을 공급하며, 또한 공기의 열량을 높게 해주는 열교환기를 제어기가 조절한다. 이때 동작점을 선정하여 원하고자 하는 목표값에 도달할 수 있도록 제어기가 조절된다.

냉난방 시스템의 상태방정식이 이중선형 시스템으로서 선형 시불변을 갖고, 상태행렬 A가 $A'Q + QA = 0$ (단 Q는 양의 값)을 만족하는 시스템이라고 생각한다. 그리고 상태값 $X \in R^n$, 제어입력 $U \in R^m$ 갖고, 이때 제어입력이 식 (12)와 같이 된다.

$$u = K_r x \tag{12}$$

제어입력을 식 (12)의 상태방정식에 대입하면 식 (13)과 같이 되며, 이 제어기는 상태 및 제어값을 유지하는 페루프 시스템을 갖는다.

$$\delta \dot{X} = (A + B_0 K_r) \delta X + \sum_{i=1}^m \delta X_i B_i K_r \delta X + EV \tag{13}$$

이 상태방정식은 어떤 상태 공간에서 점근적으로 안정한 시스템이 되어야 한다. 그래서 Lyapunov의 방법으로 적용하면 아래와 같다.

$$V(x) = x' P x, P = P' > 0$$

위와 같이 상태변수가 양의 값을 갖고, V(x)를 미분하면 식 (14)와 같이 된다.

$$\dot{V}(x) = x' [(A + B_0 K)P + P(A + B_0 K)]x + 2x' P S \tag{14}$$

$$S = \sum_{i=1}^m x_i B_i K x$$

$\Phi_1 \subset R^n$ 으로 정의하자.

$$\Phi_1 = \left\{ x, s \geq \left(\sum_{i=1}^m x_i B_i \right)' T \left(\sum_{i=1}^m x_i B_i \right) \right\} \tag{15}$$

이때 S 와 T를 양의 대칭 행렬로 표현된다. 그리고 모든 $x \in \Phi_1$ 되기 위해서는 식 (14)와 같이 되어야 한다.

$\dot{V}(x)$ 를 다시 정리하면 식 (16)과 같이 된다.

$$\dot{V}(x) = [(A + B_0 K)'P + P(A + B_0 K) + PT^{-1}P + K'SK]x - (PX - TS)'T^{-1}(PX - TS) - (X'KSKX - S'TS) \tag{16}$$

$W + W' > 0$ 이 되기 위해서 P와 K를 선택된다면 식 (17)과 같이 된다.

$$(A + B_0 K)'P + (PA + B_0 K) + PT^{-1}P + K'SK = -W \tag{17}$$

$$S \cong \theta \hat{S}, T \cong \mu \hat{T}, W \cong \varepsilon \hat{W}$$

그리고 Kleinman's의 알고리즘을 적용하여 이중선형 시스템인 냉난방에 설계하면 매개변수는 아래와 같다.

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Deress 와 E. Noldus의 정리에 의해서 행렬 S, T 와 W 조절벡터를 도입하고, 그리고 스칼라의 양 θ, μ 와 ε 를 선택하여 ($\theta = 1 \times 10^{-7}, \mu = 1, \varepsilon = 10^{-6}$) 값을 갖는다. 식 (17)을 대치하여 다시 정리하면 식 (18)과 같이 된다.

$$\varepsilon S \hat{W} G = G(-A)' + (-A)G - GK'B_0 - B_0 K G - \frac{1}{\mu} \hat{T} - 1 - \theta GK'SKG \tag{18}$$

식 (18)는 Riccati 대수방정식으로 해 G을 찾을 수 있다. 제어입력의 궤환이득 K를 식 (19)로 선택할 수 있다.

$$K = -\frac{1}{\theta} \hat{S}^{-1} B_0' G^{-1} \quad (19)$$

또한 냉난방 시스템에 있어서 외란을 고려하지 않을 수 없다. 즉 거주공간에 있어서 열량부하, QI을 외란으로 하여 시불변 상태 궤환의 제어입력을 식 (20)와 같은 구조를 갖는다.

$$\delta u_{DR} = -K_R \delta x - K_D \delta V \quad (20)$$

이때 궤환제어이득 K_D 는 위에서 (14)-(19) 이득 K_R 을 구한 것과 마찬가지로 Deress와 E. Noldus의 정리에 의해서 식 (21)과 같이 구할 수 있다.

$$K_D = -\hat{S}^{-1} B_0^T P_V \quad (21)$$

이때 행렬방정식의 해 P_V 는 식 (18)로부터 유도하여 아래와 같은 방정식 (22)로 표현할 수 있다.

$$-A_0^T P_V - G^{-1} E H - P_V D - G^{-1} B_0 \hat{S}^{-1} B_0^T P_V = 0 \quad (22)$$

따라서 냉난방 시스템의 G 의 해와 궤환제어이득값 K_R , K_D 는 각각 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$G = \begin{bmatrix} 8.2890 & -6.2030 \\ -6.2030 & 4.6710 \end{bmatrix} \times 10^6$$

$$K_R = \begin{bmatrix} 0.0850 & 0.1129 \\ -0.0720 & -0.0956 \end{bmatrix}$$

$$K_D = \begin{bmatrix} -0.0861 & -0.1146 \\ 0.0729 & 0.0970 \end{bmatrix} \times 10^{-7}$$

5. 시뮬레이션

이중 선형시스템을 갖는 냉난방시스템에 대한

시뮬레이션은 임의의 가상 거주공간을 Fig. 1과 같이 설정하고 이에 대한 계수는 Table 1과 같이 설정한다. 그리고 현재 외부의 공기온도, 거주공간의 공기온도 및 각 구간의 덕트 내의 온도를 $T_0=6^\circ\text{C}$, $T_2=9^\circ\text{C}$, $T_3=9^\circ\text{C}$ 와 같다고 가정하고, 또한 거주공간에서 원하는 목표 공기온도를 각각 T_2 , $T_3=18^\circ\text{C}$ 라고 할 때, 공기조화기와 열교환기가 원하고자 하는 온도를 추종하는지를 확인한다

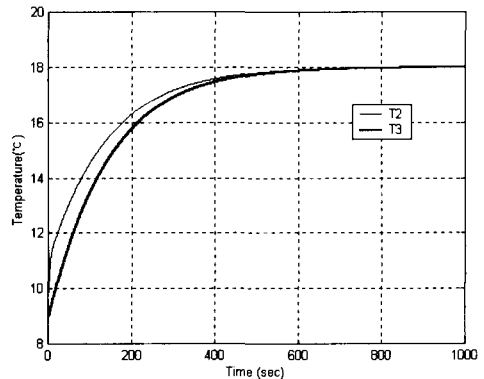


Fig. 3 거주공간의 온도 변화

즉 Fig. 3은 거주공간의 공기온도 추종에 대한 결과로서 열교환기를 거쳐 거주공간으로 들어가는 공기온도 T_2 가 거주공간 밖으로 나오는 공기온도 T_3 보다 빠르게 목표 온도에 도달하는 것을 보여주고 있으며, 그 이유는 거주공간의 열량 부하로 인한 결과를 보여주고 있으며, 또한 Fig. 4 및 5는 제어입력이 공기공급 팬의 공기흐름률 f 와 열교환기의 공급열량으로 거주공간의 공기온도를 높여 주고 있다.

Fig. 6, 7 및 8은 냉난방 시스템에 외란이 있을 때의 제어입력과 거주공간의 공기온도 추종을 보여주고 있다.

Fig. 9, 10 및 11은 입력 U_1 의 공기흐름률 f 와 입력 U_2 인 열교환기의 열량을 각각 14.45 m/sec, 8,000 W로 높였을 때, 그 결과를 제어입력과 거주공간의 공기온도 추종을 보여주고 있다. 즉 공

기의 흐름률과 열교환기의 열량을 높일 때 빠른 거주공간 내의 목표 공기온도에 접근하는 것을 보여주고 있다.

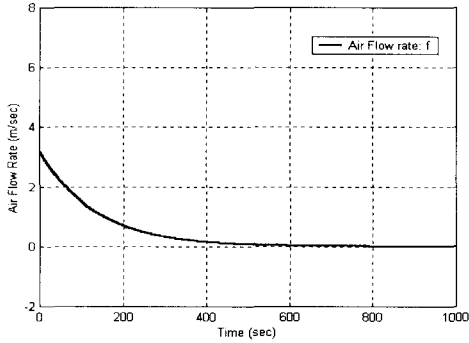


Fig. 4 제어입력 u_1

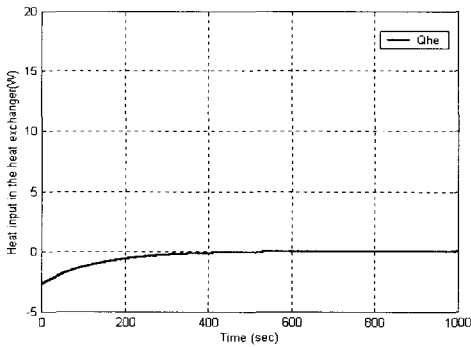


Fig. 5 제어입력 u_2

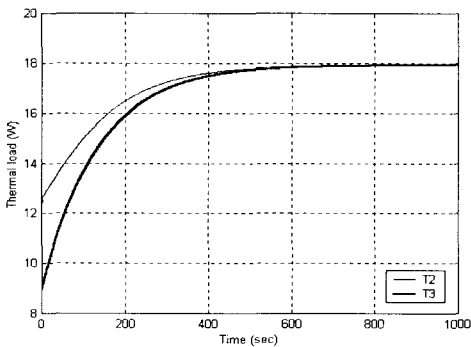


Fig. 6 외란이 있을 때 거주공간의 온도 변화

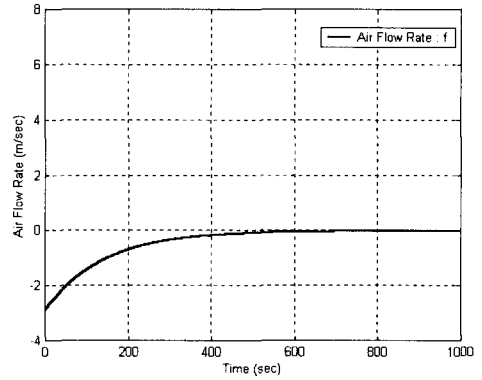


Fig. 7 외란이 있을 때의 제어입력 u_1

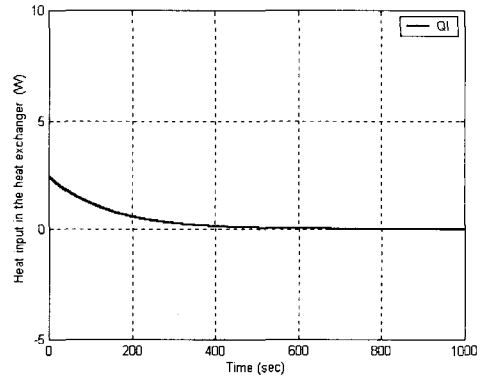


Fig. 8 외란이 있을 때의 제어입력 u_2

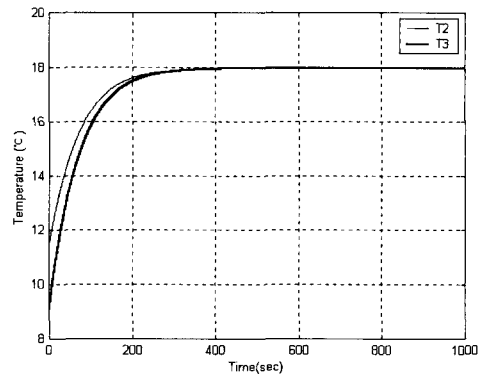


Fig. 9 입력 u_1 및 u_2 증가시의 온도 변화

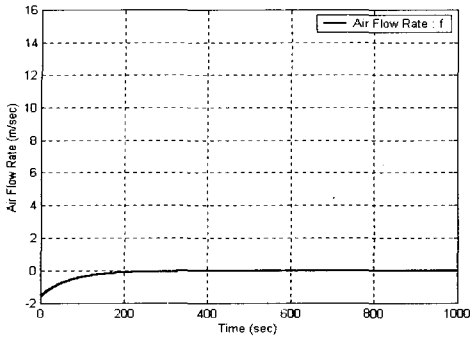


Fig. 10 입력 u_1 및 u_2 증가시의 제어입력 u_1 의 변화

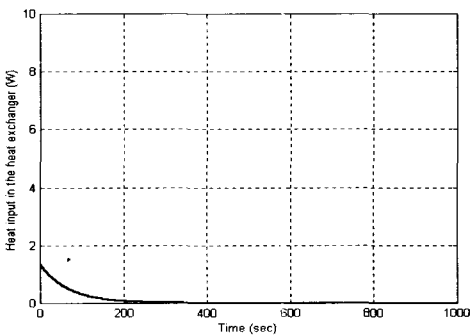


Fig. 11 입력 u_1 및 u_2 증가시의 제어입력 u_2 의 변화

6. 결론

본 논문은 냉난방 시스템의 모델이 이중 선형 시스템으로서 Lyapunov의 비선형 제어이론과 Deress와 E. Noldus 궤환제어의 이득설계이론을 이용하여 제어를 설계하였다. 이중선형 시스템의 제어가 입력신호인 공기흐름률과 열량을 조절하였을 때 설정온도에 정확히 추종하는 결과를 보여주었고, 또한 냉난방 시스템에 외란이 발생했을 때 제어가 실내온도를 제어할 수 있었다. 따라서 제어기의 성능 여부는 시뮬레이션의 결과를 통하여 입증하였고, 그 결과는 아래와 같이 보여 주고 있다.

i) 제어입력 $u_1 = 7.45 \text{ m/sec}$, $u_2 = 4000 \text{ W}$ 를

주었을 때, 거주공간의 온도($9 \text{ }^\circ\text{C}$)가 목표온도에 약 800 sec 정도에서 도달하는 것을 보여주었다.

ii) 거주공간내의 외란이 존재할 경우에도 제어기는 원하고자 하는 온도를 추종하는 것을 보여주었다(단, 목표온도에 약 $0.018 \text{ }^\circ\text{C}$ 편차를 갖는다).

iii) 특히 이중선형 제어기의 제어입력($f=14.45 \text{ m/sec}$, $Q_{he}=8000 \text{ m/sec}$)을 증가하였을 때 빠른 시간(약 400 sec)에 목표온도에 도달하는 것을 보여주었다.

참고 문헌

1. S. Svoronos, G. Stephanopoulos, "On bilinear estimation and control", *Int. J. Control*, Vol. 34, No. 4, pp. 651-684, 1981
2. D. B. Cherkas, A. Abdelmessih, and M. Townsend, "A direct digital control algorithm for control of a single environmental space", *Tran. ASME*, Vol. 107, pp. 324-331, 1985
3. J. I. Levenhangen and D. H. Spethman, "HVAC Control and Systems", New York, McGraw-Hill, 1993
4. I. Derese and E. Noldus, "Design of lines feedback laws for bilinear systems", *Int. J. Control*, Vol. 31, No. 2, pp. 219-237, 1980
5. K. V. LING and A. L. DEXTER, "Expert Control of Air-conditioning Plant", *Automatica*, Vol. 30, No. 5, pp. 761-773, 1994.
6. R. E. Rink and H. Q. Le, "Multivariable feedback control of bilinear processes in HVAC systems", in *Proc. 24th IEEE Midwest Symp. Circuits Syst.*, Albuquerque, NM, pp. 777-781, 1981
7. L. Guo and H. Schwarz, "A control scheme for bilinear systems and application to a secondary controlled hydraulic rotary drive", *IEEE Proc. of the 28th Conference*, pp. 542-547, 1989,
8. Chokri Mechmeche, Samuel Nowakowski, "On the obser design for bilinear systems with bounded input subjected to unmeasurable disturbances", *Proc. of the 1997 IEEE International on Control Applications*, pp. 350-355