

H_{∞} 제어를 이용한 공기압 구동시스템의 위치제어 성능 향상에 관한 연구

High Speed Positioning of a Pneumatic Control System with a H_{∞} Controller

장 지 성

J. S. Jang

Key Words : Dynamic characteristics of a control valve(제어 밸브의 동특성), High speed positioning control(고속 위치제어), H_{∞} controller(H_{∞} 제어기)

Abstract : To improve control performance, especially positioning speed, of a pneumatic positioning system, dynamic characteristics of a control valve should be considered. In case we design controller including dynamic characteristics of a control valve, it's not easy to design controller gain using simple state feedback because degree of a control system is increased. This study designed controller using loop shaping of H_{∞} control theory for a model composed of a pneumatic actuator and a control valve, and positioning experiment using this controller was performed. As a result, it was verified that the controller is useful for high speed positioning of a pneumatic positioning system.

1. 서 론

새로운 제어이론의 발달 및 공기압 요소의 성능 향상에 의해서 공기압 액츄에이터를 이용한 고성능의 위치 제어를 달성하기 위한 연구가 활발하게 수행되어지고 있다. 그 중에서도 공기압 실린더를 이용한 위치제어는 공기압 특유의 압축성에 기인하는 제어문제 때문에 많은 연구자에 의하여 다양한 연구결과가 발표되어지고 있다¹⁾. 하지만 지금까지의 연구는 대역폭이 수 헤르쯔[Hz]의 위치제어를 수행한 것이 대부분이고 제어밸브의 동특성이 제어계의 성능에 미치는 영향은 적었다. 하지만 더욱 고속의 위치제어를 수행하는 경우에는 제어밸브의 동특성이 제어계에 영향을 미칠 수 있기 때문에 제어밸브의 동특성을 고려한 제어기를 설계해야만 된다. 저자는 고속 및 고정밀도의 위치제어를 수행하기 위한 위치제어 시스템을 제안하고 그 성능에 관해서 발표했다²⁾. 제어밸브의 동특성을 포함한 제어기의 설계를 수행할 때는 제어밸브의 동특성을 고려함으

로써 제어모델이 고차모델로 되기 때문에 단순한 상태피드백을 이용해서는 제어계인을 결정하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 H_{∞} 제어 이론을 사용하여 주파수 응답의 계인을 정형하는 것에 의해 제어기를 도출하고 대역폭이 수십 헤르쯔[Hz]의 고속위치제어를 수행했다.

2. 실험 장치

2.1 위치제어계의 구성

본 연구에서 사용한 위치제어계의 구성을 Fig. 1에 나타낸다. Fig. 1은 액츄에이터의 본체를 절단한 그림으로, 액츄에이터의 가공정밀도를 높이고 피스톤의 질량을 감소시키기 위해서 액츄에이터의 재질은 세라믹으로 되어있다. 액츄에이터의 중앙부로부터 배어링용 압력(P_b)을 공급하면 피스톤실과의 차압에 의한 유량이 양피스톤실에 흘러들어가서 피스톤과 액츄에이터의 본체가 비접촉으로 구동되어지는 구조로 되어있다. 또한 배관에 의한 영향을 피하기 위해서 제어밸브를 액츄에이터의 양측면에 직접 연결했다.

접수일 : 1998년 9월 30일

장지성 : Kyocera Co. FC 개발부

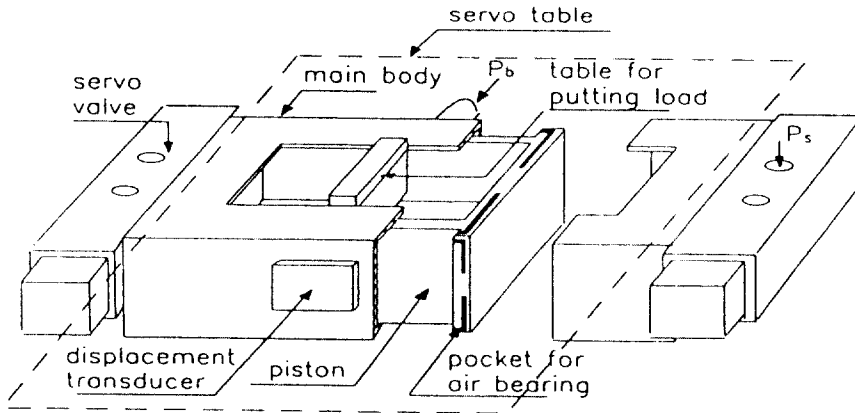


Fig. 1 Configuration of the Servo system

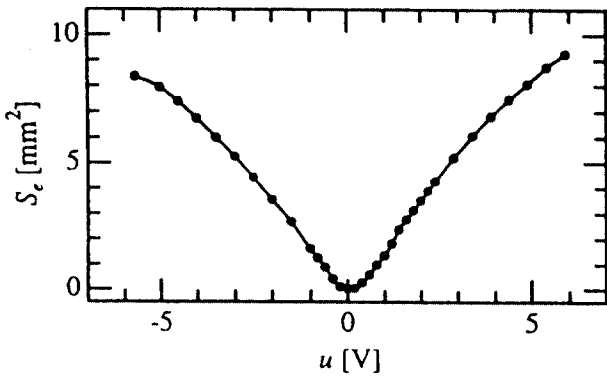


Fig. 2 Input-output characteristics of the control valve

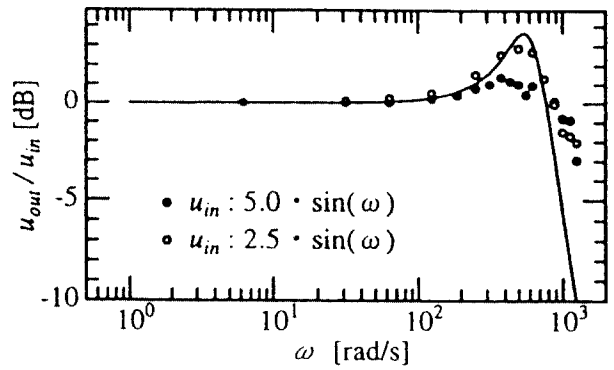


Fig. 3 Frequency response of the control valve

2.2 제어밸브의 특성

제어밸브(Tokyo precision Co. P057-010)의 입출력 특성 및 주파수 특성을 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타낸다.

Fig. 3에서 \bullet 는 입력의 개인을 제어밸브의 최대 입력의 100%로 설정한 경우, \circ 는 50%로 설정한 경우의 실험결과를 나타낸다. u_{in} 은 제어밸브로의 입력전압을 나타내고, u_{out} 은 스푼(spool)의 위치를 나타낸다. Fig. 3에서 알 수 있는 것처럼 제어밸브는 30[Hz]부근에서 오버슈트(over shoot)특성을 가지고 있고, 입력진폭에 따라서 고주파영역의 특성이 다르다.

이 가정한다.

- (1) 제어밸브는 중립점 근방에서 작동하고 중립점에서의 공기의 누설은 없다.
- (2) 좌우의 제어밸브의 특성은 같다.
- (3) 액츄에이터는 좌우대칭이다.
- (4) 베어링기구의 작용에 의해서 마찰력은 없다.
- (5) 피스톤실에는 항상 베어링기구용의 공기가 흘러들어가기 때문에 피스톤실내의 열이동이 아주 빠르게 발생한다. 따라서 피스톤실내의 공기의 온도변화는 등은 변화이다.

가정(1)~(5)에 의해 제어밸브로의 입력으로부터 액츄에이터의 피스톤의 위치변화까지의 전달함수는 다음과 같이 된다.

3. 제어밸브의 동특성을 고려한 H_∞

제어기의 설계

제어시스템의 모델을 단순화하기 위해서 다음과 같

$$G_0(s) = \frac{x(s)}{u(s)} = \frac{k_n \omega_n^2}{s(s^2 + \omega_n^2)} \quad (1)$$

여기서, $k_n = \frac{k_g R \theta_a}{A P_0}$

$$\omega_n^2 = \frac{AP_0L}{Mx_0(L-x_0)}$$

k_q : 제어밸브의 유량계인

R : 가스정수, θ_a : 대기온도

A : 피스톤의 수압면적

L : 스트로크, x_0 : 평형위치

M : 질량, ω_n : 제어계의 고유진동수

제어밸브의 동특성은 Fig.3의 실선에 의해서 근사하여 2차지연 모델로써 사용했다. 제어밸브의 동특성을 고려한 위치제어계의 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$G_1(s) = \frac{x(s)}{u(s)} = \frac{k_n \omega_n^2}{s(s^2 + \omega_n^2)} \cdot \frac{\omega_{sv}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{sv}s + \omega_{sv}^2} \quad (2)$$

실험장치의 파라미터를 표1에 나타낸다.

Table 1 Experimental parameters of the control system

| | | | |
|-------|----------------------------|---------------|--------------|
| A | 0.002667 [m ²] | R | 287 [J/kgK] |
| k_q | 0.080442 [kg/sV] | x_0 | 0.025724 [m] |
| L | 0.051448 [m] | θ_a | 293 [K] |
| M | 0.48 [kg] | ζ | 0.35 |
| P_0 | 140 [kPa] | ω_{sv} | 628 [rad/s] |
| P_s | 150 [kPa] | | |

제어밸브의 동특성을 고려하고, 전달함수 $G_1(s)$ 를 이용해서 제어기를 구성하는 경우, 모델의 차수는 5차로 되고 상태피드백의 설계 방법으로는 제어기를 설계하는 것이 간단하지 않다.

표 1의 파라미터를 이용한 모델 $G_0(s)$ 와 $G_1(s)$ 의 주파수 특성을 Fig. 4에 나타낸다. 파선은 제어밸브의 동특성을 고려하지 않은 전달함수 $G_0(s)$ 를 나타낸다. 약 250[rad/s]에 보여지는 계인의 피크는 공기의 압축성과 부하(load)에 기인하는 공진주파수이다. 실선은 $G_1(s)$ 를 나타내고 약 10[Hz]이상의 넓은 범위에서 $G_0(s)$ 와의 차이가 보여진다. 특히 제어밸브의 공진주파수 근방에서의 계인과 위상의 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 모델

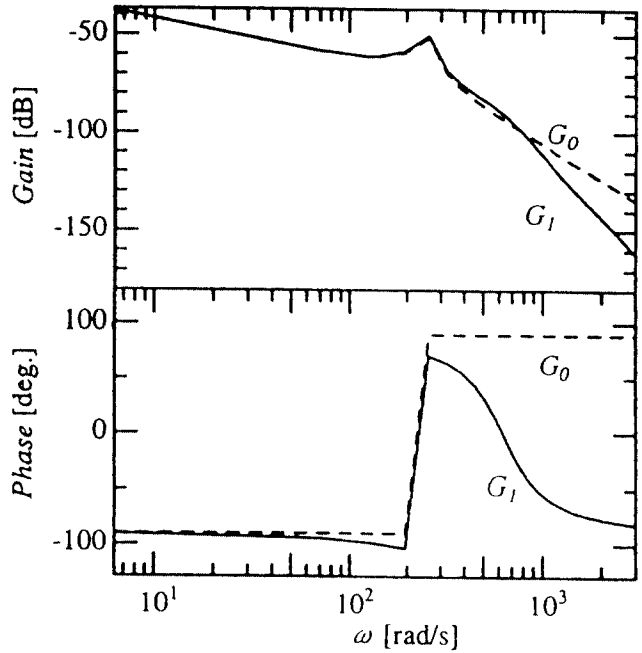


Fig. 4 Frequency response of the $G_0(s)$ and $G_1(s)$

의 변화를 고려하지 않고 H_∞ 제어이론의 주파수정형수법을 이용해서 $G_1(s)$ 를 공칭모델로 하는 콘트롤러를 설계한다. 감도함수를 S 로하고 상보감도함수를 T 로 하면, 혼합 감도 문제의 설계사양은 식 (3)으로 나타낸다.

$$\left\| \frac{W_s S}{W_T T} \right\|_\infty < 1 \quad (3)$$

식 (3)에서 W_s 와 W_T 는 감도함수와 상보감도함수의 하중함수이다. 혼합감도문제의 일반화 플랜트를 Fig. 5에 나타낸다.

$G_1(s)$ 는 허축에 특이점을 가지고 있기 때문에, 표준 H_∞ 제어문제의 해의 존재성에 위반하지만, 이

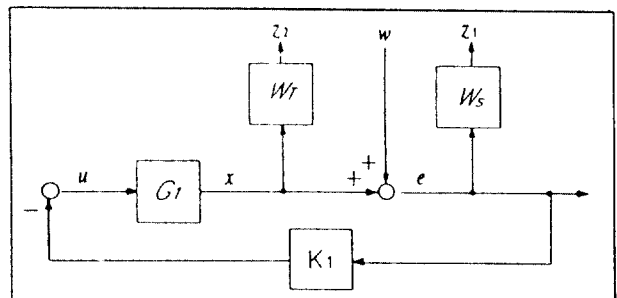


Fig. 5 Mixed sensitivity problem of $G_1(s)$

러한 문제에 대응하기 위하여, 다양한 방법이 개발되어 있다. 본 연구는 다음의 방법을 이용했다³⁾.

[1] $G_1(s)$ 를 상태공간표현으로 나타낸다.

$$G_1(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$$

[2] A를 허축상에서 η 만큼 이동시킨다.

단, $\eta < 0$

$$\hat{A} \leftarrow A - \eta I$$

[3] $G_1(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ 를 이용하여, 표준 H_∞ 제어 문제를 풀어서 제어기 $\hat{K}_1(s)$ 를 구한다.

[4] 구한 제어기 $\hat{K}_1(s)$ 를 허축 상에서 η 만큼 되돌리고, $G_1(s)$ 에 대한 제어기 $K_1(s)$ 를 구한다.

$$A_k \leftarrow \hat{A}_k + \eta I,$$

$$K_1(s) = C_k(sI - A_k)^{-1}B_k + D_k$$

W_s 및 W_T 와 다음과 같이 결정했다.

$$W_T^{-1} = 9 \cdot 10^{13} / s^5 \quad (4)$$

$$W_s^{-1} = \frac{s^2 + 230s + 10^4}{3.5s^2 + 190s + 80} \quad (5)$$

설계결과 얻어진 감도함수, 상보감도함수 및 하중함수를 Fig. 6에 나타낸다.

$G_1(s)$ 를 이용해서 얻어진 제어기와의 비교를 위해서, 제어밸브의 동특성을 고려하지 않은 $G_0(s)$ 를 공칭모델로써 이용한 경우는 위치오차, 피스톤의 이동속도 및 가속도를 이용한 삼차의 상태피드백 제어기를 사용했다. 단지 고속 위치제어의 경우, 위치

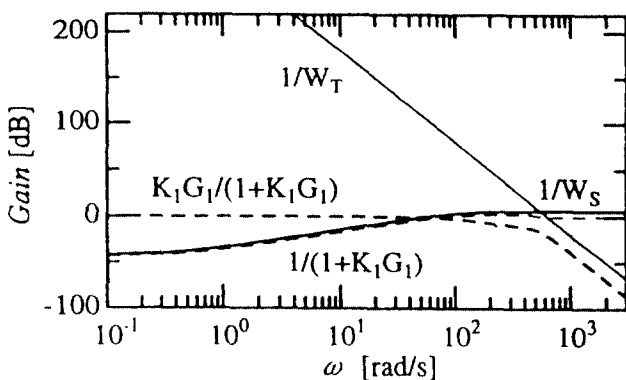


Fig. 6 Sensitivity function, complementary sensitivity function and specification of weighting functions

의 변화로부터 가속도를 구하는 경우는 위상이 지연되기 때문에, 위치로부터의 미분치 대신에 압력의 변화량을 이용해서 가속도로 환산한 값을 이용했다. 그때의 제어기로부터의 출력은 다음과 같이 된다.

$$u = eK_x - \frac{dx}{dt} K_v - \Delta P \frac{A}{M} K_a \quad (6)$$

식 (6)과 제어밸브의 동특성의 영향을 무시한 $G_0(s)$ 에 의해 구성되어진 제어계를 Fig. 7에 나타낸다.

Fig. 7의 폐루프전달함수는 다음과 같이 된다.

$$\frac{x(s)}{x_r(s)} = \frac{k_n \omega_n^2 K_x}{s^3 + k_n \omega_n^2 K_a s^2 + (K_n \omega_n^2 K_v + \omega_n^2)s + k_n \omega_n^2 K_x} \quad (7)$$

Fig. 7 중에서 제어기의 부분을 $K_1(s)$ 와 비교하기 위해 Fig. 8로 등가 변화한다. Fig. 8에서 $K_0(s)$ 는

$$K_0(s) = \frac{(s^3 + \omega_n^2 s) K_x}{s^3 + k_n \omega_n^2 K_a s^2 + (k_n \omega_n^2 K_v + \omega_n^2)s} \quad (8)$$

이다.

$K_0(s)$ 를 이용할 때는 $K_1(s)$ 와 정상계인이 같아지도록 상태피드백의 계인을 설정한 경우와 제어밸브의 동특성의 영향이 나타나지 않도록 정상계인을 충분히 낮게 설정한 경우의 실험을 수행하여, $K_1(s)$ 를 이용한 경우와 비교한다. 표2에 실험에 사용한 $K_0(s)$ 의 계인을 나타낸다.

$K_0(s)$ 와 $K_1(s)$ 의 계인특성을 Fig. 9에 나타낸다. 그림에서 실선은 $G_1(s)$ 를 이용한 $K_1(s)$ 의 계인 특성을 나타내고, 일점쇄선 및 파선은 $G_0(s)$ 를 이용한

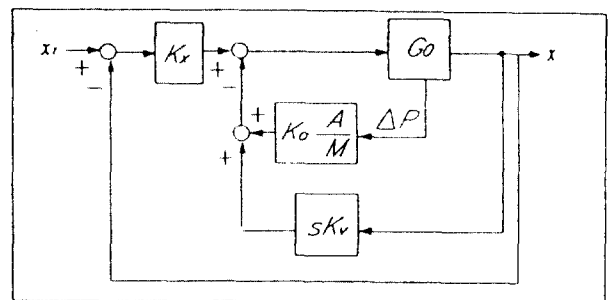


Fig. 7 Position control system composed of the state feedback controller and $G_0(s)$

Table 2 State feedback gain of $K_0(s)$

| gain | K_x | K_v | K_a |
|--------|-------|-------|--------|
| case 1 | 2000 | 15.67 | 0.0878 |
| case 2 | 5000 | 39.34 | 0.1191 |

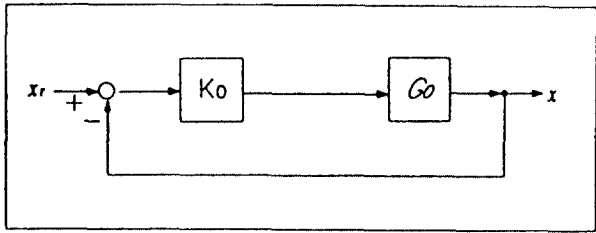


Fig. 8 Equivalent transformation of Fig. 7

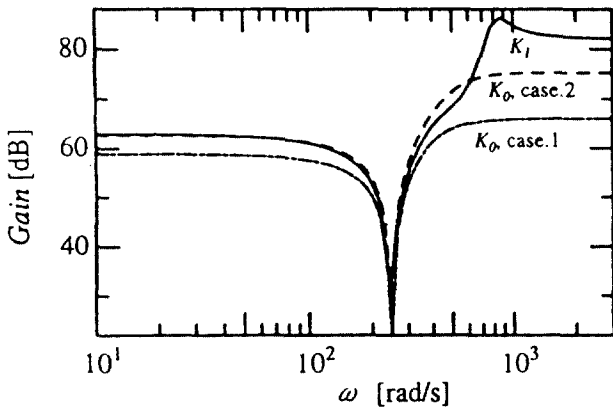


Fig. 9 Gain characteristics of $K_0(s)$ and $K_I(s)$

$K_0(s)$ 의 케이스1 및 케이스2를 나타낸다. 얻어진 $K_I(s)$ 와 $K_0(s)$ 의 케이스2를 비교하면, 어느 경우에도 Fig. 4의 게인특성에서 보여지는 공칭모델의 파크특성을 잘 나타내고 있고 공진주파수 부근에서 제어기의 게인이 극소적으로 감소하고 있다. 또한 $G_1(s)$ 의 게인이 $G_0(s)$ 의 게인보다 커진 지점에서 $K_I(s)$ 가 $K_0(s)$ 보다 적어지고, $G_0(s)$ 로부터 제어밸브의 동특성에 의해 변형되어진 $G_1(s)$ 를 $K_I(s)$ 가 잘 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

$K_0(s)$ 및 $K_I(s)$ 를 이용한 실험결과를 Fig. 10~12에 나타낸다. 모든 결과에서 실선은 실험결과를 나타내고 파선은 선형시뮬레이션의 결과를 나타낸다. Fig. 10은 $K_0(s)$ 의 케이스1을 이용한 결과이고, Fig. 11은 $K_0(s)$ 의 케이스2를 이용한 결과이다. 또한

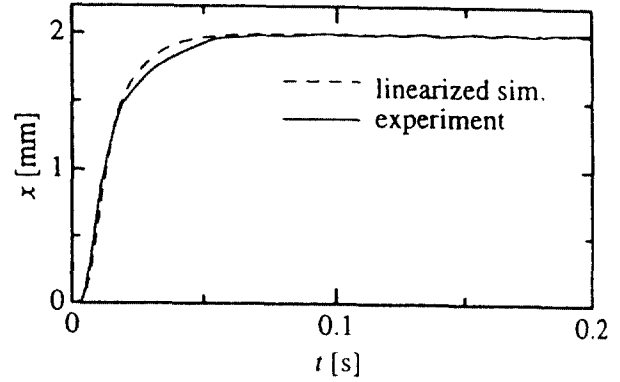


Fig. 10 Experiment results using case 1 of $K_0(s)$

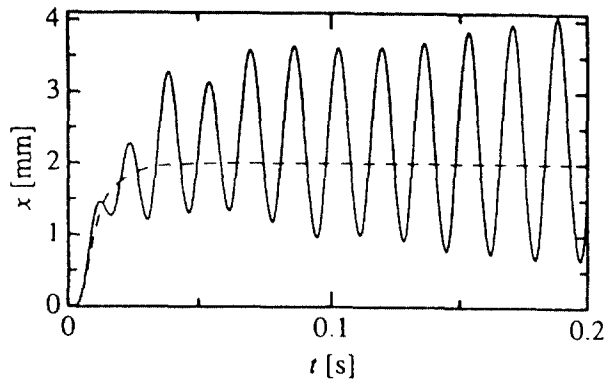


Fig. 11 Experiment results using case 2 of $K_0(s)$

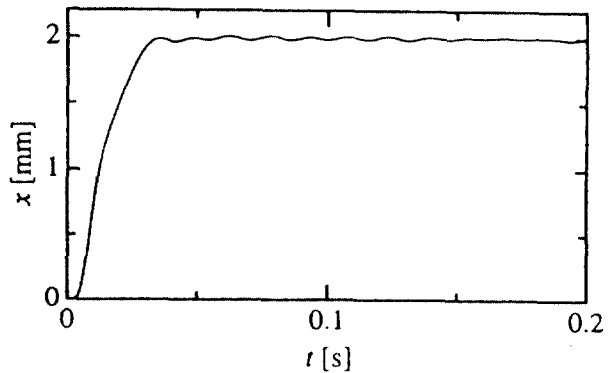


Fig. 12 Experiment results using $K_I(s)$

Fig. 12는 $K_I(s)$ 를 이용한 결과를 나타낸다. Fig. 10으로부터 제어밸브의 동특성의 영향을 줄이기 위하여 정상게인을 충분히 낮게 설정한 경우는 상태피드백만을 이용해도 양호한 제어결과가 얻어짐을 알 수 있다. 하지만 $K_0(s)$ 의 케이스2를 이용한 Fig. 11

의 경우는 피스톤의 응답이 불안정하게 되어버리고 상태피드백만으로는 만족할 수 있는 제어결과가 얻어지지 않는다는 것을 알 수 있다. $K_I(s)$ 를 이용한 Fig. 12의 경우는, Fig. 11의 경우와 정상계인은 같지만 제어를 설계할 때 제어밸브의 동특성을 고려했기 때문에 폐루프계가 안정하게 되어 안정한 성능이 얻어지고 있다.

5. 결 론

공기압 구동기구를 사용하여 고속의 위치제어를 수행하는 경우에는 제어밸브의 동특성을 고려한 제어를 설계해야 한다.

본 연구에서는 제어밸브의 동특성을 고려한 공칭 모델과 H_∞ 제어이론의 혼합감도 문제를 응용하여 위치제어를 수행했다. 또한 제어밸브의 동특성을 고려하지 않고 상태피드백 제어를 사용한 경우의 결과와 비교하는 것에 의해서 얻어진 제어기의 유효성을 확인했다.

참고문헌

1. 高岩, 則次, “外亂オブザーバを用いた空気壓シリンダの位置決め制御”, 計測自動制御學會論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 82~88, 1995
2. 香川ら, “靜壓機構を利用したエアサーボテーブルの高速・精密位置決め”, 平成8年春季油空壓講演會論文集, pp. 81~84, 1996
3. The MathWorks, Inc., “Robust Control Toolbox User’s Guide”, pp. 70~71, 1992