

연속적 가변구조 제어에 의한 강인한 유압서보계의 설계

*권기수, **곽동훈, ***허준영, ****이진걸
*부산대 대학원 **현대중장비 연구소 ***부산대 정밀기계공학과

Design of the Robust Hydraulic Servomechanisms
by Continuously Variable Structure Control

*K.S.Kwon D.H.Kwak **J.Y.Huh ***J.G.Lee
*Pusan National Univ. **Hyundai C.E.I. ***Pusan National Univ.

ABSTRACT

A method to design a robust servomechanism by continuously variable structure control is proposed. The state and control signal of this servomechanism do not chatter since a continuous control scheme is used. The input-output relation of this servomechanism is determined by prescribing a hyperplane in a state space of which the neighborhood is asymptotically attractive everywhere. This control mechanism was applied to a single rod cylinder servomechanism which has the nonlinearities due to their nonsymmetrical structure and its excellency was verified.

1. 서론

가변구조이론에 의한 슬라이딩제어는 불연속 피드백제어로서 상태공간내에 설정한 초평면에 슬라이딩모드를 발생시켜 제어대상의 상태궤적을 구속하여 매개변수의 변동, 비선형성, 잡음 등에 불감한 실용적인 제어법이라고 말할 수 있다.

이 원리는 시스템의 출력을 목표치 신호에 추종시키는 모델 추종제어나 서보(servomechanism)의 구성에 응용되고 있다.

그런데 슬라이딩(sliding)상태제어는 실제로는 샘플링(sampling)시점 만에서 피드백 계인의 절환이 행하여지기 때문에 절환지연동에 기인하는 채터링(chattering)이 생긴다. Slotine 등은 이것을 피하는 한 방법으로서 포화함수법에 의한 방법을 제안하고 있지만 이것에 의해 생기는 오차 및 궤도가 구속초평면에 수렴하는 상황에 대해서는 일반적인 논의가 불가능하다.

본 논문에서는 목표치 신호가 실시간에서 주어지고 이것에 출력을 추종시키는 유압서보계를 연속적 가변구조 제어에 의해 실현하는 설계법을 제안한다. 그리고 편로드유압실린더는 일반산업용으로 널리 취급되는 액츄에이터로서 다방면에 사용되고 있으나 피스톤의 수압면적이 다르기 때문에 동특성이 비선형적이어서 서보액츄에이터로서는 문제점을 지니고 있다. 그러므로 새롭게 제안된 설계법을 편로드유압서보계에 적용하여 그의 우수성을 증명하였다.

이 설계법에는 오차 및 궤도의 구속초평면의 수렴속도를 어느 정도로 설정하는가를 미리 정할 수가 있다. 당연히 실현시킬 수 있는 서보계는 파라미터변동, 외란, 비선형성에 강하고 채터링을 만들지 않는 이상적인 응답이 기대될 수 있다.

2. 편로드실린더서보계의 모델링

편로드실린더로 구동되는 동력기구의 개략도를

Fig.1에 나타낸다

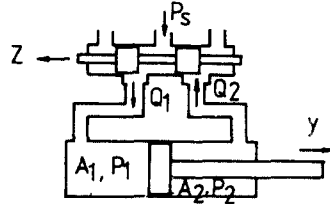


Fig.1 Configuration of valve-cylinder-load 밸브-실린더-부하계의 수학적 모델은 서보밸브의 스플변위와 피스톤의 변위 사이의 관계이다. Fig.에서는 피스톤 양실의 단면적이 다르므로 유량식은 피스톤의 속도의 부호와 관계가 있다.

누유나 액체용적 탄성에 의한 유량은 피스톤 운동에 의한 유량보다 훨씬 적다고 하고, 실린더 좌우 양실의 유량비를 η 로 하면

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{A_2}{A_1} = \begin{cases} \sqrt{P_2/(P_s - P_1)}, & x_p > 0 \\ \sqrt{(P_s - P_2)/P_1}, & x_p < 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

이다.

서보밸브의 부하압력-유량특성은 비선형적이므로 설계에 위해서 동작점 부근에서 선형화하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_L = K_{qk} X_v - K_p \cdot P_L \quad (2-2)$$

여기서

$$K_{qk} = \alpha C_d w \sqrt{(P_s - P_{L0})/\rho} \quad \text{: 유량이득}$$

$$K_{pk} = \frac{\alpha C_d w x_v \sqrt{1/\rho}}{2\sqrt{P_s - P_{L0}}} \quad \text{: 유량-압력이득}$$

이다.

유압실린더의 부하유량식은

$$Q_L = A_{m0} X_p + \frac{V_0}{4\beta_0} P_L + C_{tp} P_L \quad (2-3)$$

여기서

$$C_{tp} = C_{ip} + C_{op} / 2 \quad \text{: 피스톤 전체 누유계수}$$

$$A_{m0} = (A_1 + A_2) / 2 \quad \text{: 평균단면적}$$

$$V_0 = C_1 A_1 L_s = A_0 L_0$$

$$C_1 = (1 + \eta^2) / (1 + \eta)$$

이다.

유압실린더의 구동력 F_g 는 다음과 같이 표시된다.

$$F_g = A_1 P_1 - A_2 P_2 = M_t x_p + B_p x_p + L x_p + F_L \quad (2-4)$$

식(2-1)을 대입하면

$$A_0 P_L = (M_t x_p + B_p x_p + L x_p + F_0) \quad (2-5)$$

여기서

$$F_0 = F_L - F_{ad} \quad : \text{동가의외란력}$$

$$F_{ad} = (1-C_2)a \cdot p_a \quad , \quad \dot{x}_p > 0 \quad : \text{부가의부외란}$$

$$C_2 \cdot a \cdot p_a \quad , \quad \dot{x}_p < 0$$

$$C_2 = 1/(1+\eta^2)$$

이다.

3. 가변구조계의 설계

제어대상을 다음의 n차의 system으로 한다.

$$y^{(n)} = - \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot y^{(i)} + bu + d \dots \dots \quad (3-1)$$

단, u, y는 입력 및 출력을 나타낸다. d는 외란으로서 |d|의 최대치는 알고 있는 것으로서 한다. 계수 $a_i, i=1, 2, \dots, n$, b는 변동하기도 하고 측정오차를 동반하는 것으로 하지만 치(値)가 존재하는 변동영역은 기지에 있는 것으로 한다. 또 일반성을 잃지 않고, $b > 0$ 을 가정한다.

시스템의 궤도를 어떤 초평면 부근에서 수렴하기 위해서와 목표치 신호에의 추종이라고 하는 두 개의 다른 목적을 달성하기 위해서 슬라이딩(sliding)상태 서보계의 경우와 같은 모양으로 시스템에는 2개의 독립인 입력이 필요하게 된다. 거기서 독립인 입력을 증가할 목적으로 가장 단순한 동적인 시스템으로서 적분기를 (3-1)에 결합하여 확대계를 만든다. 그의 확대계를 상태방정식으로 나타내면

$$\dot{x}_0 = x_1 - v \quad (3-2)$$

$$\dot{x}_i = x_{i+1} \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

$$\dot{x}_n = - \sum_{i=1}^n a_i x_i + bu + d \quad (3-3)$$

$$y = x_1 \quad (3-4)$$

로 된다. 단 x_0 는 적분기의 상태변수로서, v는 새롭게 부가된 입력이다. 적분기의 입력은 시스템의 출력과 새롭게 부가된 입력의 차(差)이다.

확대계의 궤도를 구속하는 초평면을 다음 식으로 정의한다.

$$\sigma = \sum_{i=0}^n c_i x_i \quad (3-5)$$

단 $c_i, i=0, 1, 2, \dots, n-1$ 는 후에 검토하는 정수로서 $c_n=1$ 로 한다.

입력 u를 다음으로 한다.

$$u = \sum_{i=0}^n (a_i x_i - h_i(x)) + \beta v - k(x, v) - g(x) \quad (3-6)$$

단 $a_i, i=0, 1, 2, \dots, n, \beta$ 는 정수, $h_i(x), i=0, 1, 2, \dots, n, k(x, v), g(x)$ 는 각각 위에 정의하는 비선형 함수이다. 본장에서는 $a_0=0, h_0(x)=0$ 으로 한다.

또, $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 를 의미한다.

Lyapunov함수 $V(x) = \sigma^2 / 2$ 를 정의하고 확대계의 궤도에 따라서 $V(x)$ 의 시간미분을 취하고, 식(3-6)을대입하면

$$\dot{V}(x) = \sigma \sum_{i=0}^n c_i x_i \dots \dots \quad (3-7)$$

$$= b\sigma \sum_{i=1}^n \{((c_{i-1}-a_i)/b + a_i) x_i - h_i(x)\} + b\sigma\{(\beta - c_0/b)v - k(x, v)\} + b\sigma\{d/b - g(x)\} \quad (3-8)$$

을 얻는다.

결국 이하와 같이 제어칙을 뽑으면 $\sigma=0$ 의 근방, $\Sigma\rho = \{x: \sigma \leq \rho\}$ 을 제외한 $V(x) < 0$ 이 항상 보증되고 궤도는 $\Sigma\rho$ 에 향하고 $\Sigma\rho$ 에 들어간 궤도는 그중에 머문다. ρ 는 후에 정의 된다.

$$a_i, i=1, 2, \dots, n, \beta \text{를}$$

$$a_i = ((c_{i-1}-a_i)/2)(1/b_{min} + 1/b_{max}) \quad (3-9)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$\beta = \frac{c_0}{2} \left(\frac{1}{b_{min}} + \frac{1}{b_{max}} \right) \quad (3-10)$$

로 뽑는다. b_{min}, b_{max} 는 b의 최대치 및 최소치 이다. 또 $h_i(x), i=1, 2, \dots, n, k(x, v), g(x)$ 를

$$h_i(x) = h_i \frac{\sigma}{|\sigma| + \delta_i} |x_i|, i = 1, 2, \dots, n \quad (3-11)$$

$$k(x, v) = k \frac{\sigma}{|\sigma| + \delta_v} |v| \quad (3-12)$$

$$g(x) = g \frac{\sigma}{|\sigma| + \delta_d} \quad (3-12)$$

로 뽑는다. 단 h, k, g는 정수로서

$$h_i > \max_b \left[|q_i| + \delta_i / \gamma_i \right] \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3-13)$$

$$k > \max_b \left[|q_v| + \delta_v / \gamma_v \right] \quad (3-14)$$

$$g > \max_{b, d, L} \left[|d|/b + \delta_d / \gamma_d \right] \quad (3-15)$$

를 만족한다. 여기서 기호를 간단하게 하기 위해

$$q_i = (c_{i-1} - a_i)/b + a_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$q = \beta - c_0/b$$

로 정의한다.

$\delta_i, i=1, 2, \dots, n, \delta_v, \delta_d, \gamma_i, i=1, 2, \dots, n, \gamma_v, \gamma_d$ 는 적당한 正의 수이다.

여기서 나타나는 제어칙은 $\delta_i, i=1, 2, \dots, n, \delta_v, \delta_d$ 를 영으로 하면 분명히 2차의 절환 제어칙이 되어 채터링(chattering)이 생기지만 이들을 적당한 값으로 설정하는 것에 의해 채터링은 피할수 있다. 증명은 문헌 (12)와 같은 모양으로 용이하게 행하여지기 때문에 생략하지만 ρ 는

$$\max_b \left[r_c \max_b |q_i|, i=1, 2, \dots, n, r_v \max_b |q_v|, r_d \max_{b, d} |d|/b \right] \quad (3-16)$$

로서 주어진다. 따라서 $\gamma_i, i=1, 2, \dots, n, \gamma_v, \gamma_d$ 를 작게 취하므로서 ρ 를 작게 할 수 있고 궤도를 임의로 $\sigma=0$ 의 근방에 붙잡아 둘수 있다. 또 이들을 작게 해가

면 적당한 치로 고정된 $\delta_i, i=1,2,\dots,n, \delta_v, \delta_d$ 에 대해서 큰 $h_i, i=1,2,\dots,n, k, g$ 가 필요하게 되고 결과적으로 큰 계인을 요구하는 것으로 되어 실현성의 관점으로 문제가 생긴다.

식 (2-5)와 같이 표현되는 편로드 실린더를 사용한 전기-유압서보 시스템의 위치제어를 위한 연속적 가변 구조제어기를 다음과 같이 구성한다.

일반적으로 위치제어시스템에서는 스프링이 부착되어 있지 않으며, 또한 대개의 경우 댐핑실린더를 사용하지 않으므로 점성마찰계수도 매우 작아 측정가능한 물리량만으로 상태변수를 선정하기 위하여 2차계로 모델링하여 가변구조제어기를 구성한다. 따라서 압축성의 영향은 고려하지 않는다. 그리고 모델링의 간략화를 위하여 누유의 영향도 무시한다. 이상의 가정 아래에서 식 (2-2), (2-3)을 정리하면

$$A_m \ddot{x}_p = K_q \alpha x_v - K_p P_L \quad (3-17)$$

$$P_L = 1/K_p (K_q \alpha x_v - A_m \ddot{x}_p) \quad (3-18)$$

위의 식을 식 (8)에 대입하여 정리하면

$$\ddot{x}_p = \frac{A_0 K_q \alpha}{K_p A_m M_t} x_v + \frac{A_0 A_m}{K_p A_m M_t} \ddot{x}_p - \frac{F_0}{M_t}$$

이다. 상태변수를 각각 $x_1 = (x_p - x_{pd}), x_2 = \dot{x}_p, U = E$ 로 둔다. 여기서 $E = x_{pd} - x_p$ 로서 오차변위이다. 적분기를 결합하여 확대계를 만들면

$$\dot{x}_0 = x_1 - v$$

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{T_1} x_2 + \frac{K}{T_1} U + D$$

여기서

$$K = K_m K_t K_q \alpha / A_m \quad D = F_0 / M_t$$

$$T_1 = K_c M_t / (A_0 A_m)$$

이다.

계수는 변동하기도 하고 측정오차를 동반하는 것으로 하지만 치(值)가 존재하는 변동영역은 기지에 있는 것으로 한다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본연구에 의한 이론의 타당성을 검토하기 위하여 디지털 컴퓨터로 시뮬레이션하였다.

시뮬레이션에 사용한 값은 table 과 같다

단, 질량, 유압압력계수 그리고 계인등이 변할 때 영향을 검토하기 위하여 다음과 같이 주기적으로 변동시켜서 시뮬레이션하였다.

$$m_t = 30 + (40-20)/3 \times \sin(4\pi t)$$

$$k_p = 1.75 + (3.2-3)/3 \times \sin(4\pi t)$$

$$k = 1.43 + (1.80, 8-106)/s \times \sin(4\pi t)$$

이 시스템에 대해서 제어를 하여 실현하는 싶은 임출력 특성은 다음의 2차계에 있다고 한다.

$$y(s) = \frac{392}{s^2 + 28s + 392} v(s) \quad (4-1)$$

Table 1 parameters of simulation data

parameter	value	dimension
D_1	4.0	cm
D_2	2.24	cm
M_t	30	kgf
P_0	30	kgf/cm ²
K_a	10	V/cm
K_b	0.1	V/cm/sec
β_0	7000	kgf/cm

이 2차계는 $\xi = 0.5 \quad \omega_n = 28$ 이다.

적분기를 결합하여 확대계를 만든다. 계도의 구속 표현은 (3-5)(4-1)로 부터

$$\sigma = 392x_0 + 28x_1 + x_2 \quad (4-2)$$

이다.

$\delta_1 = \delta_2 = \delta_v = \delta_d = 0.8$ 로 뽑고 각 γ_i 를 δ_i/r_i 가 각각 $\max_b |q_i|, i=1,2,\dots, \max_b |q_v|, \max_b |d/b|$ 의 약 1/3정도로 되도록 설정하면 (3-10)에서 (3-15)로 부터

$$u = -20.3x_1 - 1.4x_2 + 20.3v - [28.1|x_1| + 5.7|x_2| + 28.1|v| + 4.8] \frac{\sigma}{|\sigma|+10.0} \quad (4-3)$$

가 얻어진다.

5. 결과 및 고찰

1. 시뮬레이션 결과

Fig. 2는 질량, 압력유량이득 그리고 계인이 변동할 때의 제어입력, 시스템거동과 기준모델(Reference)의 거동을 일초동안에 2Hz의 구형파를 목표치로 출 때의 거동을 나타내고 Fig. 3은 파라미터(Parameter)가 변동하지 않을 때의 제어입력, 시스템 기준모델(Reference Model)의 거동을 나타낸다.

편로드 실린더의 비선형성과 파라미터(Parameter)의 변동에도 불구하고 시스템이 기준모델(Reference Model)을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 그리고 제어입력 또한 채터링(Chattering)이 일어나지 않고 연속적으로 거동함을 알 수 있다. Fig. 4, 5는 10Hz의 사인파를 주었을 때의 거동이며 마찬가지로 파라미터(Parameter)변동과 편로드 실린더의 비선형성은 둔감한 강인한 거동을 나타내고 있다. Fig. 6, 7은 제어입력의 식에서 σ 의 값을 0으로 하였을 때의 결과로써 제어입력은 그래픽을 위하여 1/10으로 축소하여 나타낸 것으로서 제어입력의 채터링(Chattering)의 정도를 가히 짐작 할 수 있다.

Fig. 8와 9은 PID제어기에 의한 제어입력 시스템, 모델의 거동을 나타낸 것으로서 파라미터를 변동시켰을 때와 변동시키지 않았을 때의 그림이다. 파라미터가 변동하지 않을 때에는 어느정도 시스템이 기준모델을 따라가나 파라미터가 변동할 경우에는 시스템이 기준

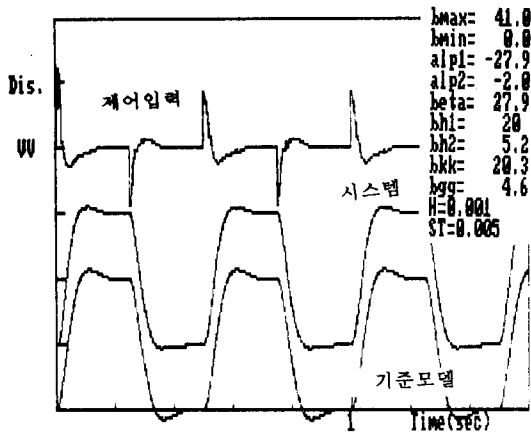


Fig. 2 파라메터 변동시 가변구조응답곡선
(구형파입력)-2Hz

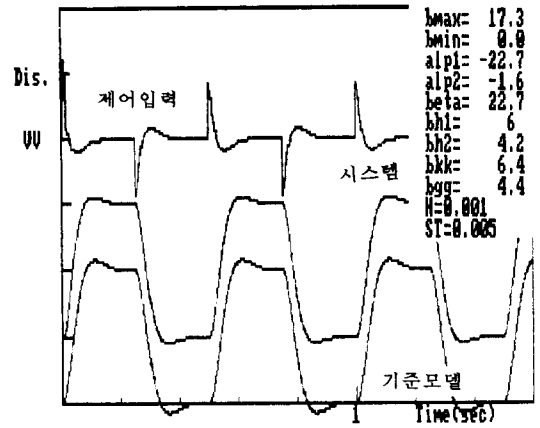


Fig. 3 파라메터 불변시 가변구조응답
(구형파입력)-2Hz

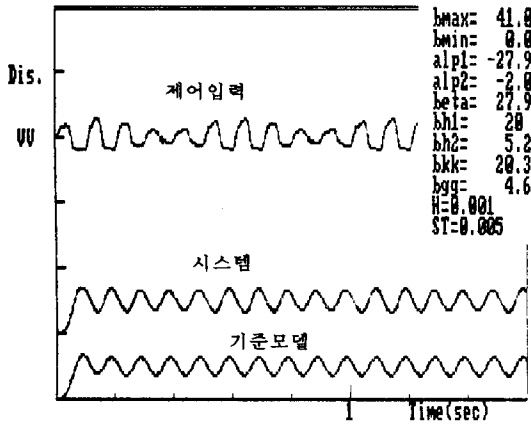


Fig. 4 파라메터 변동시 가변구조응답곡선
(사인파입력)-10Hz

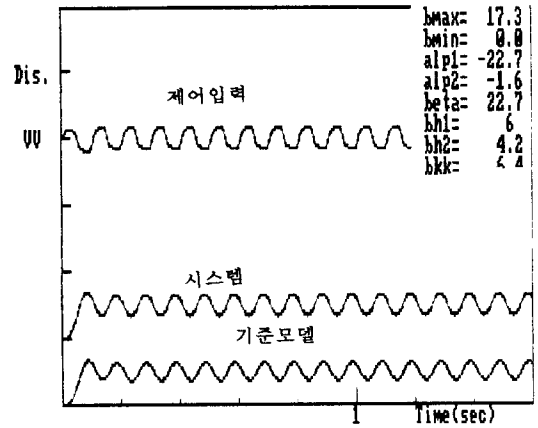


Fig. 5 파라메터 불변시 가변구조응답
(사인파입력)-10Hz

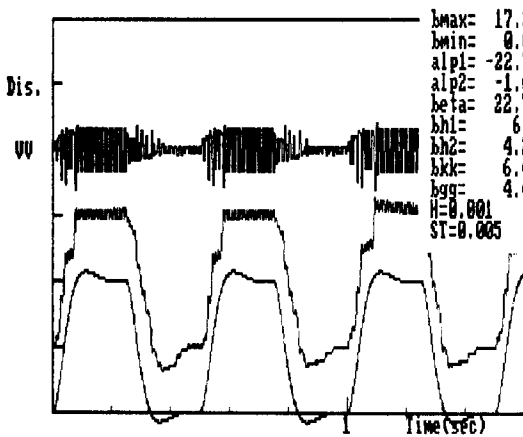


Fig. 6 파라메터 불변시 가변구조응답
(구형파입력)-2Hz $\delta=0$

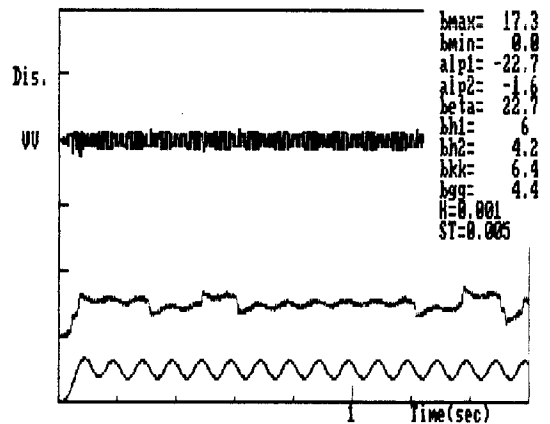


Fig. 7 파라메터 불변시 가변구조응답
(사인파입력)-10Hz $\delta=0$

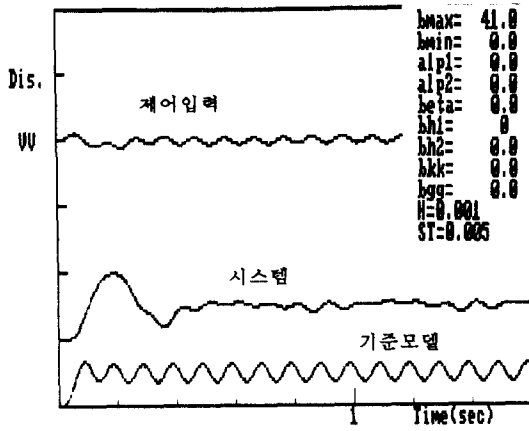


Fig. 8 파라미터 변동시 PID응답
(싸인파입력)-10Hz

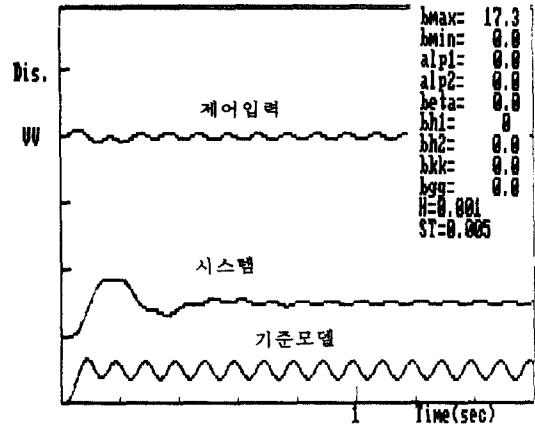


Fig. 9 파라미터 불변시 PID응답
(싸인파입력)-10Hz

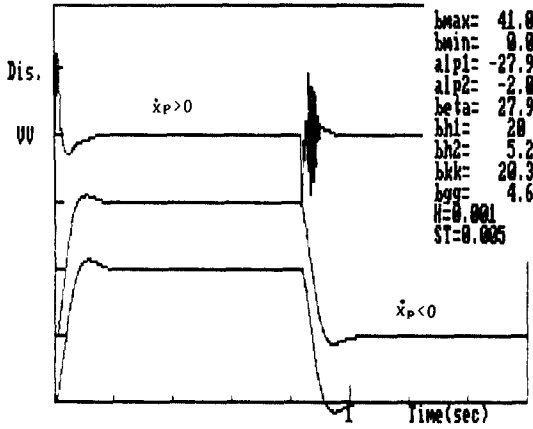


Fig. 10 파라미터 변동시 가변구조응답
피스톤속도변동

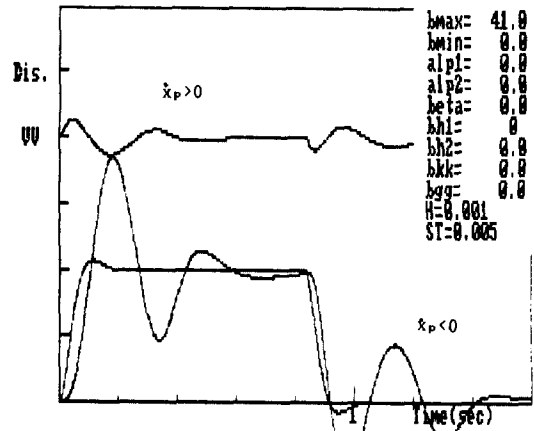


Fig. 11 파라미터 불변시 PID응답
피스톤속도변동

모델을 추종한다고 말할 수 없다. Fig. 10과 11은 피스톤의 운동방향에 따른 연속적 가변구조제어기와 PID제어기의 시뮬레이션결과이다. 연속적가변구조제어기는 피스톤의 운동방향에 관계없이 기준모델에 추종하나 PID제어기는 헌팅이 과도적으로 존재함을 알 수 있다.

2. 실험결과

설계된 연속적 가변구조 제어기에 의한 제어방식의 응답성능의 우수성을 입증하고 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교하기 위하여 다음과 같이 실험하였다.

실험장치의 전기회로부는 피드백사제품의 EHS-160과 Dowty사 제품의 서보밸브와 서보앰프를 사용하였으며 VSS제어는 IBM-PC AT급(CPU Intel 80286) 마이크로프로세서로 구성하였고 오차변위와 속도, 기준입력을 분해능 12bit A/D로 읽어들이었으며 제어입력 출력시켰고 Fig. 11은 그 배치도를 나타낸다. Fig. 13과 Fig. 14는 연속적가변구조에 의한 실험결과로서 그림13은 구형파(5Hz)에 대한 제어입력과 시스템응답 선도이다.

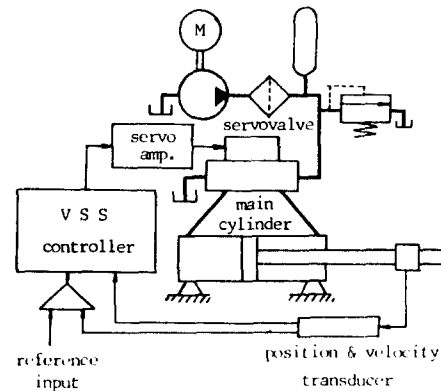


Fig. 12 실험장치의 배치도

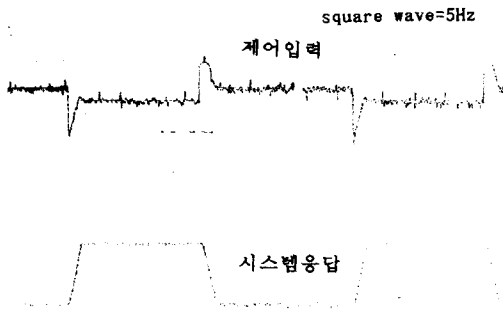


Fig. 13 실험결과
ps=30kgf/cm².

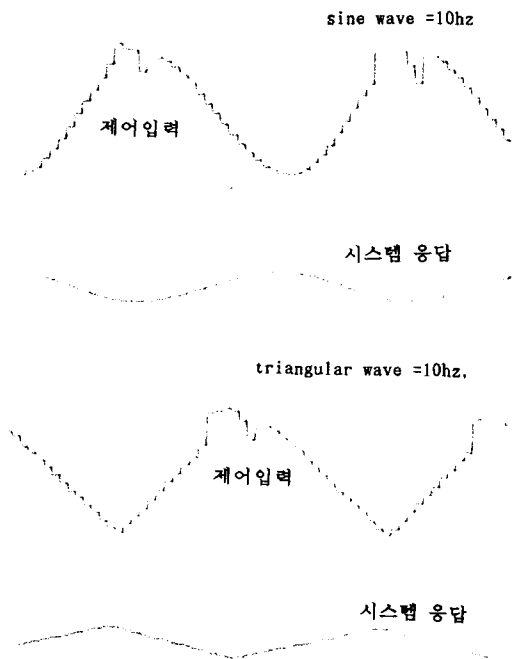


Fig. 14 실험결과
ps=30kgf/cm².

제어입력은 목표신호가 변동할때 연속적 제어입력을 발하여 체터링도 없는 응답이 나올 수 있고 Fig. 14는 10Hz 싸인파에 대한 제어입력과 시스템응답 선도를 보여주고 있다. 실험결과와 시뮬레이션 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

시스템의 궤도를 임의의 초평면에 수렴시키기 위한 것과 목표치신호에의 추종이라고 하는 두개의 다른 목적을 달성하기 위해서 슬라이딩상태서보계와 마찬가지로 시스템에는 2개의 독립인 입력이 필요하게 된다.

그러므로 독립인 입력을 증가할 목적으로 적분기를 시스템에 결합하여 확대계를 만들고 확대계의 궤도를 구속하는 초평면의 도달조건을 만족하는 제어입력을 구하였다. 이 연속적인 가변구조제어의 알고리즘을 피스톤의 수압면적이 다르기 때문에 동특성이 비선형적이어서 서보액츄에이터로서는 문제점을 지니고 있는 편로드 유압서보계에 적용하여 체터링의 발생없이 외란에 강인하고 비선형성에 강한 계의 구성이 증명되었다. 이 제어법칙은 궤도를 상태공간에 설정한 초평면 근방에서 궤도를 구속하는 것에 의하여 실현하였지만 제어칙의 결정에 대해서 궤도를 초평면에 수렴시키는 빠르기 및 어느정도 초평면의 부근에 구속하는가도 결정하는 것이 가능하다.

참 고 문 헌

- (1)Utkin, V. I., *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-22-2(1977), 212.
- (2)Itkis, U., *Control Systems of Variable Structure*, (1976) John Wiley.
- (3)原島·橋本, *시스템と制御*, 29-2(昭60), 94 and 29-4 (昭60), 242
- (4)Young, K. D., *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-22-2(1977), 279.
- (5)Young, K. D., *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-23-6(1978), 1079.
- (6)Zinober, A. S. I., *ほか2名, IEE Proc.*, 129-Pt. D-1(1982), 6.
- (7)Slotine, J. J. and Sastry, S. S., *Int. J. Control*, 38-2 (1983), 465.
- (8)Slotine, J. J., *Int. J. Control*, 40-2 (1984), 421
- (9) 川島, *機論*, 54-497, C(昭63), 183.
- (10)Hikita, H., *Int. J. Control*, 掲載豫定.
- (11) 川島, *機論*, 53-496, C(昭62), 2551.
- (12)Ambrosino, G., *ほか2名, IEEE Trans. Autom. Control*, AC-30-3(1985), 275