

과잉 감쇠 반응을 나타내는 전기 유압식 서어보

시스템의 위치 제어

송 창 섭
한양대학교 정밀기계공학과

박 태 규
한양대학교 대학원 정밀기계공학과

김 세 창
대전기계장

Position Control of the Overdamped
Electrohydraulic Servosystem

Chang - Seop Song,
Han Yang University

Tae - Kyu Park , and
Han Yang University

Se - Chang Kim
Daejeon Machine Depot

ABSTRACT

This paper is describes the improvement of the transient response of the electrohydraulic position control system which exhibit the overdamped characteristics. A new approach, Position Error Prefiltered Proportional (PEPP) control, is proposed and the computer simulation results for the transient responses are analyzed.

Experimental results using Z-80 microprocessor are presented.

1. 서 론

전기 유압식 서어보 시스템은 증폭과 조절이 용이한 전기적 특성과 높은 마력의 출력에 비하여 장치가 간단하고 가벼운 유압 장치의 특성을 종합하여 사용하는 시스템으로서 아주 작은 입력 신호를 가지고 유압실린더나 모우터의 유량 또는 압력에 변화를 주어 기계적 고풍출력 증폭을 기한다. 1) 이러한 전기 유압식 서어보 시스템의 설계에 있어서 동적 응답의 요구조건 즉, 시스템의 응답속도와 안정도는 매우 중요하다. 그러므로 전기유압식 서어보 시스템의 동적 응답 특성을 개선하기 위하여 보상방법에 대한 많은 연구가 진행 되어왔다. 2), 3) 본 연구에서는 전기 유압식 서어보 시스템의 위치 제어에서의 응답 특성이 과잉 감쇠반응을 나타낼때 이 시스템의 동적 특성을 개선하기 위하여 Position Error Prefiltered Proportional (PEPP) 제어 알고리즘을 적용하였으며, 마이크로 프로세서와 이 제어 알고리즘을 이용하여 디지털 제어기를 설계 및 제작 하였다. 8)-10) 디지털 PEPP 제어기로 전기 유압식 서어보 시스템의 동적 특성이 개선 되었는지를 알아보기 위하여 시스템의 모델

및 제어 알고리즘을 차등 방정식으로 변환 시켜 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 동적 특성을 분석하였으며 디지털 PEPP 제어기를 사용하여 실험함으로써 전기 유압식 서어보 시스템의 동적 특성이 개선 되었음을 확인 하였다.

2. 전기 유압식 서어보 시스템의 모델링

전기 유압식 서어보 시스템은 오차 신호 증폭기, 서어보 밸브 구동 증폭기, 서어보 밸브, 유압 모우터 및 위치 센서로 구성되어 있다. 작동 원리는 전기적 입력 신호와 위치 센서로부터 나온 전기 신호의 차가 오차 신호 증폭기 및 서어보 밸브 구동 증폭기를 통하여 서어보 밸브의 토오크 모우터에 전류를 공급하면 토오크 모우터의 자기력이 발생됨에 따라 스프울을 이동 시켜 유량이 액츄에이터인 유압 모우터에 들어가 원하는 위치 만큼 부하를 회전 시키게 된다.

전기 유압식 서어보 시스템은 전기적 히스테리시스, 유체의 오리피스 유동 저항 변화, 압력비에 따른 오리피스 계수의 변화 및 기계적 부분의 Coulomb 마찰력 등의 많은 비선형성을 내포하고 있는 복잡한 시스템이므로 직접적인 해석 기법을 적용하기가 어렵다. 그러므로 이와 같은 시스템의 해석을 단순화 시키기 위해서 대부분의 운동 방정식은 선형화 기법을 도입 하였는데 실제로 유압 시스템의 역학적 특성의 해석에서 선형화 이론이 비교적 잘 일치하는 것으로 알려져 있으므로 5) - 7) 본 연구에서도 전기 유압식 서어보 시스템의 모델을 선형화 시켜 해석하였다. 주어진 시스템을 서어보 밸브부와 액츄에이터부로 나누어 각 부의 전달 함수를 구하고 이로부터 상태 공간 함수를 얻어 Tandem Connection 하면 다음과 같다.

서어보 밸브의 동 특성은 근사적으로 1차 또는 2차 전달 함수로 표시할 수 있으며5) 여기서는 식(2-1)과 같이 1차 전달 함수로 표시한다.4)

$$G_1(s) = \frac{Q_L(s)}{V_X(s)} = \frac{K_S}{s + \omega_s} \quad (2-1)$$

$$K_S = \frac{K_X}{T_X}, \quad \omega_s = \frac{1}{T_X}$$

유압 모우터 및 부하의 수학적 모델은 1), 4) 액튜에이터내의 유량 유입에 따른 관계식인

$$Q_L = D_m \frac{d\theta_m}{dt} + \frac{V_t}{4\beta_e} \cdot \frac{dP_L}{dt} \quad (2-2)$$

와 모우터의 토크 Balance 방정식으로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$T_g = P_L \theta_m = J_t \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + G \theta_m + T_L \quad (2-3)$$

식 (2-2)와 식 (2-3)으로부터 P_L 항을 소거하고 G 값은 일반적으로 매우 작으므로 무시하면 아래와 같은 액튜에이터부의 전달 함수를 구할 수 있다.

$$G_2(s) = \frac{\theta_m(s)}{Q_L(s)} = \frac{K_a \omega_a^2}{s(s^2 + 2\zeta_a \omega_a s + \omega_a^2)} \quad (2-4)$$

$$K_a = \frac{1}{D_m}, \quad \omega_a = \sqrt{\frac{K}{J_t}}$$

$$\zeta_a = \frac{B_m}{2\sqrt{J_t K}}, \quad K = \frac{4\beta_e D_m^2}{V_t}$$

전달 함수 $G_i(s)$ 를 상태 공간 함수로 표시하면

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_i x_i + B_i u_i \\ y_i &= C_i x_i + D_i u_i \end{aligned} \quad (2-5)$$

이며 $G_1(s)$ 와 $G_2(s)$ 를 Tandem Connection 한 전 플랜트의 상태 공간 함수는

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2-6)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ B_2 C_1 & A_2 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 D_1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ D_2 C_1 & C_2 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 D_1 \end{bmatrix}$$

이 되며 식 (2-1), 식 (2-4)와 식 (2-5)로부터 Matrices

A, B, C, D 를 구하면

$$A = \begin{bmatrix} -\omega_s & 0 & 0 & 0 \\ K_a \omega_a^2 & -2\zeta_a \omega_a & -\omega_a^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$$

$$B = \begin{bmatrix} K_S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

가 된다.

3. 전기 유압식 서어보 시스템의 제어

제어 대상은 모델 EHS 160인 유압 구동 장치를 선정하였으며, 서어보 밸브와 유압 모우터 및 부하로 구성 되어 있고 이 시스템의 동적 특성을 개선하기 위하여 제어기를 사용하였으며 출력이 변환기에 의해 변환되어지는 위치 제어 시스템이다. 이 시스템에서 서어보 앰프의 최대 입력은 2V 이므로 관계식 (3-1)에서와 같이 요구 입력 (θ_i)과 이득 (K_P) 및 변환 이득(K_F)의 곱이 2V 이상 이 되면 포화 상태가 되어 비선형 시스템이 된다.

$$u(t) = \theta_i \cdot K_F \cdot K_P \quad (3-1)$$

본 연구에서는 이 시스템이 선형 시불변 제어계가 되도록 디지털 제어기를 해석 및 설계하였으며 이 조건을 만족 하기 위해서는 제어 입력이 2V 이내로 제한이 되며 입력 명령은 계단 입력으로서 180° 의 각도만큼 움직인다고 가정한다.

플랜트 제어에서의 일반적인 시스템의 해석은 비례제어로부터 해석이 되어지며 비례 제어기로 동적 특성을 만족 시킬 수 없을 때 적분 제어 및 미분 제어를 비례 제어기에 첨가 시키거나 다른 제어 방법을 사용한다.

먼저 비례 제어기를 사용하면 이 시스템은 계단 입력의 크기에 따라서 K_P 값의 범위가 변화되며 이 K_P 값의 변화에 의해서 시스템의 응답 특성이 달라진다. 식 (3-1)에서 제어 입력 (u)이 제한될때 계단입력의 크기 (θ_i)가 작으면 상대적으로 K_P 값이 커질수 있으며 K_P 값이 커지면 시스템의 응답 특성은 과소 감쇠반응을 나타낸다. 이와 같은 시스템은 PID 제어를 함으로써 과소 감쇠 반응에 대한 정상 상태 편차를 개선해주고 Overshoot의 감소

및 정상상태 반응 구간에서의 진동을 줄여주기 때문에 응답 특성을 개선시킬 수 있다.

반대로 식(3-1)에서 제어 입력이 제한 되어질때 계단 입력의 크기가 커지면 상대적으로 K_p 값이 작아지며 이때 시스템의 응답 특성은 과잉 감쇠 반응을 나타낸다. 본 연구에서는 시스템의 응답 특성이 과잉 감쇠 반응을 나타낼때 이 시스템의 동적 특성을 개선시키기 위한 제어 방법에 대해서 논한다.

제어 입력이 제한되고 큰 계단 입력이 전기 유압식 서어보 시스템에 가해질때 이 시스템의 응답 특성이 과잉 감쇠 반응을 나타내면 PID 제어로 동적 특성을 개선하기에는 가능하지 못하다. 적분 동작을 추가할 경우 정상 상태 편차는 개선해주지만 과도상태 반응 구간에서의 속도는 개선시킬 수 없으며 또한 이 시스템의 응답 특성이 Overshoot 가 없으므로 미분 동작을 추가하면 응답 속도가 더 느려지는 경향이 나타나기 때문이다.

그러므로 전기 유압식 서어보 시스템에 계단 입력을 주면 조작 신호가 나오며, 비포화 상태에서의 조작 신호의 최대치가 제어 입력의 최대치가 되며 이 최대치를 넘으면 포화 상태가 된다. 따라서 같은 크기의 계단 입력에 대해서 필터를 사용하면 조작 신호의 최대치를 작게 할 수 있다. 조작 신호의 최대치를 작게 하면 식(3-1)로부터 K_p 값을 크게 할 수 있고 K_p 값이 커지면 이 시스템의 응답 특성은 과잉 감쇠 반응에서 과소 감쇠 반응의 경향으로 변화되어 가며 응답 속도는 좀더 빨라진다. 이와 같은 방법을 고려해서 Fig.1 과 같이 필터를 이용한 비례 제어 즉, Position Error Prefiltered Proportional 제어를 하면 시스템의 동적 특성을 개선시킬 수 있으며 다음과 같이 식으로 표현할 수 있다.

$$u(t) = K_p \cdot K_f \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \cdot (\theta_1 - \theta_0) \quad (3-2)$$

Position Error Prefiltered Proportional 제어를 할 경우 이 시스템의 특성을 좀더 정확히 파악하기 위하여 주파수 영역에서 K_p 를 변수로 한 근궤적 을 구하면 Fig. 2와 같다. Fig.2 (a)에서 제어 입력이 제한되고 큰 계단 입력이 들어올때 K_p 값의 범위는 제한되며 이때 K_p 의 최대값에서 살펴보면 P_{2k} , P_{2k}^* 및 P_{3k} 가 P_{1k} 로부터 충분히 멀리 떨어져 있으므로 이 시스템에 지배적인 영향을 주는 Pole 은 P_1 이 된다. 따라서 제한된 범위에서 K_p 값이 증가하더라도 이 시스템의 감쇠비가 거의 변하지 않으며 그림에서 보듯이 과잉감쇠 반응을 나타낸다. 그러므로 식(3-2)와 같이 한 개의 Pole 을 가진 필터를 사용해서 Fig.2 (b)와 같이 P_1 에 근접하게 한 개의 Pole (P_f)을 추가함으로써 제한된 K_p 의 범위내에서 Pole의 이동을 분리시키면 감쇠비가 급격히

감소하게 되므로 속도는 빨라지고 진동이 낮게 감소하며 진동폭도 커지게 된다. 이 시스템의 응답 특성은 과잉 감쇠 반응에서 과소 감쇠 반응으로 변하므로 필터의 주파수와 K_p 값을 잘 고려하면 시스템의 동적 특성을 개선시킬 수 있다.

다음은 컴퓨터 시뮬레이션을 하기 위하여 전기 유압식 서어보 시스템의 모델 및 PEPP 제어 법칙을 차등 방정식으로 변환시켜 플랜트를 디지털로 제어하는 것과 똑같은 방법으로 실시 하였다. 여기서 사용된 변수들은 EHS 160 Manual 4)에 나온 값들을 이용하였으며 액츄에이터의 점성 계동 계수는 이와 유사한 시스템을 참고로 하여 구하였다.

첫번째 시뮬레이션은 Position Error Prefiltered Proportional 제어를 할때 이 시스템의 동적 특성이 개선될 수 있다는 것을 보여 주며 Fig.3에서 그래프 1은 필터를 사용하지 않았을때 시스템이 포화 상태가 되지 않는 범위에서 K_p 값의 최대치를 적용해서 나온 응답 특성이며 과잉 감쇠 반응을 나타낸다. 그래프 2,3,4,5는 필터를 사용하지 않은 시스템보다 동적 특성이 개선 되었음을 알 수 있다. Fig. 4는 Fig. 3에서 나타낸 응답 특성에 대한 조작 신호이다. 그래프 1은 필터를 사용하지 않을때의 조작 신호이며 그래프 2, 3, 4, 5는 필터를 사용할 때의 조작 신호로서 필터를 사용하면 K_p 의 값을 어느정도 크게 해도 포화 상태가 되지 않음을 보여준다.

두번째 시뮬레이션은 K_p 값을 고정 시키고 필터의 주파수를 변경할 경우 이 시스템의 응답 특성을 Fig. 5에서 비교하였다. 필터의 주파수를 작게하면 근궤적에서 설명한 것과 같이 진동이 낮게 감소하고, 진동폭이 커지며, 시간 지연 현상이 일어난다. Fig. 6은 Fig. 5에 나타낸 응답 특성에 대한 조작 신호이며 필터를 사용하면 K_p 값을 크게 할 수 있고, 필터의 주파수 크기가 작으면 K_p 값을 더 크게 할 수 있다.

시뮬레이션 결과 Position Error Prefiltered 제어를 하면 조작 신호를 작게해서 K_p 값을 크게 할 수 있으며 이 K_p 값과 필터의 주파수 크기에 따라 응답 특성의 차이는 있지만 시스템의 동적 특성이 개선됨을 알 수 있다.

4. 실험 및 결과 검토

3장에서 제시한 Position Error Prefiltered Proportional 제어 법칙을 실제 플랜트상에서의 성능을 입증하고, 전기 유압식 서어보 시스템에 디지털 제어를 실현하기 위하여 디지털 제어를 설계 및 제작하였다. 실험을 하기 위한 실험장치 구성의 Block Diagram은 Fig. 7과 같으며 이 시스템을 제어하기 위한 디지털 제어기는

Z-80 마이크로 컴퓨터 (8-bit용)를 사용하였으며 시스템과 마이크로 컴퓨터를 연결하기 위하여 A/D, D/A Converter (12 bit 용) 및 PIO 를 제작 하였다.

디지털 PEPP 제어를 하기 위하여 식 (3-2)를 이산화
10) 시키면

$$e_{in}(Kh) = K_F \cdot (\theta_i - \theta_o) \quad (4-1)$$

$$e_o(Kh) = e_o(Kh-h) + \alpha \cdot h [e_{in}(Kh-h) - e_o(Kh-h)] \quad (4-2)$$

$$u(Kh) = K_p \cdot e_o(Kh) \quad (4-3)$$

이 되며, 식 (4-1) - 식 (4-3)을 이용해서 Z-80 Assembly Language로 제어 프로그램 11)을 작성하였으며 소프트웨어의 구조는 Fig. 8 과 같다. 여기서 디지털 제어기의 Sampling Rate 는 Rising 구간에서 10회정도 Sampling 하는 것이 타당하며 본 실험에서는 제어 프로그램의 실행시간인 15 msec 로 Sampling 하였다.

첫번째 실험은 PEPP 제어를 전기 유압식 서어보 시스템에 적용할 경우 동적 특성을 개선할 수 있다는 것을 확인하는 것으로 Fig. 9 와 같이 필터의 주파수 크기는 고정시키고 K_p 값을 변화 시켰다.

두번째 실험은 Fig. 10 과 같이 K_p 값을 고정 시키고 필터의 주파수 크기를 변화 시켰다.

이상의 실험 결과 과잉 감쇠 반응을 나타내는 전기 유압식 서어보 시스템에 Position Error Prefiltered Proportional 제어를 하면 시스템의 동적 특성이 개선됨을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

전기 유압식 서어보 시스템의 위치 제어에서 제어입력이 제한되고 큰 계단 입력이 시스템에 가해질 때, 이 시스템의 동적 특성을 개선하기 위하여 디지털 Position Error Prefiltered Proportional (PEPP) 제어를 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

PEPP 제어 알고리즘을 적용하면 작동 초기에 서어보 밸브에 인가되는 전압이 감소되어 K_p 값을 크게 할 수 있기 때문에 시스템의 응답속도를 개선시킬 수 있으며 제어 입력 범위내에서 K_p 값이 일정할 때 필터의 주파수 크기가 감소하면 인가 신호의 크기도 감소한다. 따라서 K_p 값을 더 증가시킬 수 있으며 K_p 값이 증가하면 시스템의 특성이 과잉 감쇠 반응에서 과소 감쇠 반응으로 변하는 경향이 나타나게 된다.

디지털 제어를 설계할 때에 제어 프로그램의 실행시간, 시스템의 Rising Time 및 기계부의 고유 진동 주파수 등을 고려하여 Sampling Time 이 충분히 짧도록 하여야 한다. 본 연구에서 설계한 디지털 PEPP 제어 알고

리즘은 계산량이 많지 않아서 8-bit 마이크로 프로세서로도 Sampling Time 이 짧은 (15 ms) 디지털 제어를 쉽게 설계 제작할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Herbert E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, INC., 1967.
2. T.R. Welch, "The Use of Derivative Pressure Feedback in High Performance Hydraulic Servomechanisms", Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Feb., 1962.
3. R. Bell and A. de Pennington, "Active Compensation of Lightly Damped Electrohydraulic Cylinder Drives Using Derivative Signals", Proc Inst Mech Engrs 1969-70, Vol. 184 pt.1 No. 4.
4. "Electro-Hydraulic Servomechanism Type EHS 160", Feedback Instruments Ltd., 1981.
5. W.J. Thayer, "Transfer Functions for Moog Servovalves", Technical Bulletin 103, Moog Servocontrols Int., Jan., 1965.
6. M.J. Vilenius and T.K. Vivaldo, "The Effect of Nonlinearities on the Dynamic Characteristics of an Electrohydraulic Servovalve", Drives Transmission and Controls, Hydraulic Pneumatic Mechanical Power, Nov., 1976.
7. Toshio Takenaka and Eizo Urata, "The Dynamic Characteristics of Oil Hydraulic Control Valve", Bulletin of JSME, Vol. 12, No.52, 1969.
8. R.J. Bibbero, "Microprocessors in Instruments and Control", New York, Wiley, 1977.
9. M Reed and H.W. Mergler, "A Microprocessor - Based Control System", IEEE Trans. on IECI, Vol. IECI - 24, No. 3, August, 1977.
10. B.C. Kuo, "Digital Control Systems", Rinehart and Winston, Inc., 1980.
11. "Z-80 Assembly Language Programming Manual", Zilog, 1980.

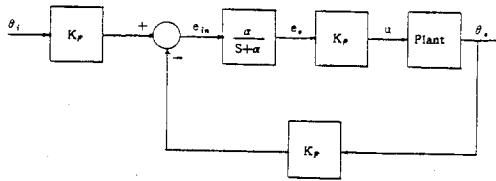


Fig. 1 . Block Diagram of Position Error Prefiltered Proportional Control System

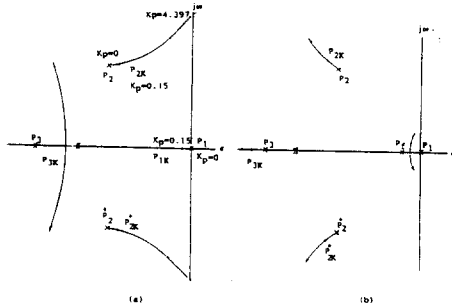


Fig. 2 . (a) Root Locus without Filter
(b) Root Locus with Filter

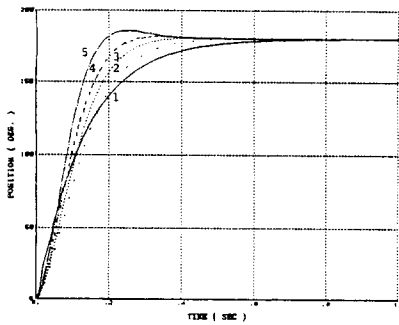


Fig. 3 . Position Error Prefiltered Proportional Control System response plot. Comparison of system response characteristics for different values of K_p .

- 1) $K_p = 0.15$
- 2) $K_p = 0.15, \alpha = 4\text{Hz}$
- 3) $K_p = 0.175, \alpha = 4\text{Hz}$
- 4) $K_p = 0.2, \alpha = 4\text{Hz}$
- 5) $K_p = 0.25, \alpha = 4\text{Hz}$

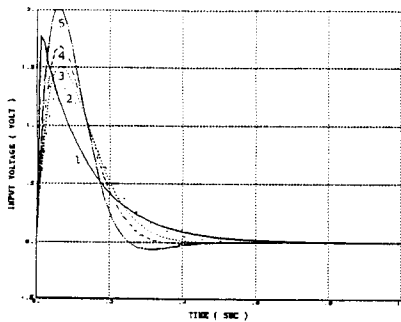


Fig. 4 . Position Error Prefiltered Proportional Control System response plot. Comparison of control signal characteristics for different values of K_p .

- 1) $K_p = 0.15$
- 2) $K_p = 0.15, \alpha = 4\text{Hz}$
- 3) $K_p = 0.175, \alpha = 4\text{Hz}$
- 4) $K_p = 0.2, \alpha = 4\text{Hz}$
- 5) $K_p = 0.25, \alpha = 4\text{Hz}$

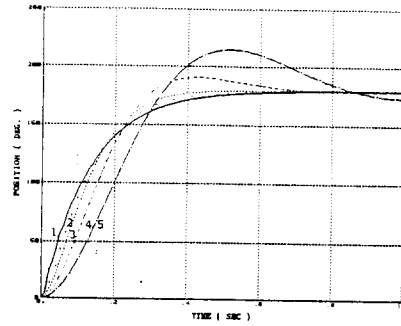


Fig. 5 . Position Error Prefiltered Proportional Control System response plot. Comparison of system response characteristics for different values of the prefilter gain α .

- 1) $K_p = 0.15$
- 2) $K_p = 0.15, \alpha = 6\text{Hz}$
- 3) $K_p = 0.15, \alpha = 4\text{Hz}$
- 4) $K_p = 0.15, \alpha = 2\text{Hz}$
- 5) $K_p = 0.15, \alpha = 1\text{Hz}$

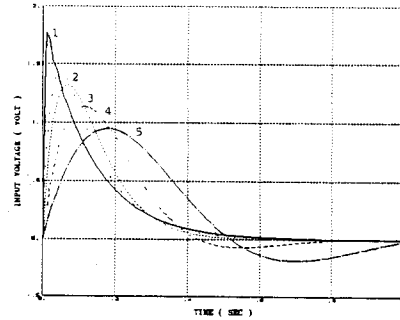


Fig. 6 . Position Error Prefiltered Proportional Control System response plot. Comparison of control signal characteristics for different values of the prefilter gain α .

- 1) $K_p = 0.15$
- 2) $K_p = 0.15, \alpha = 6\text{Hz}$
- 3) $K_p = 0.15, \alpha = 4\text{Hz}$
- 4) $K_p = 0.15, \alpha = 2\text{Hz}$
- 5) $K_p = 0.15, \alpha = 1\text{Hz}$

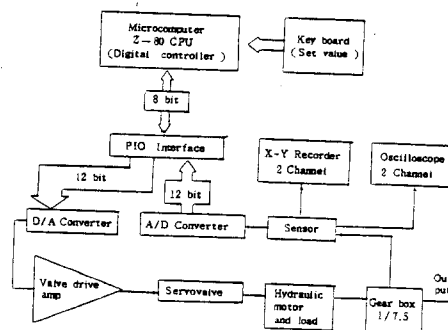


Fig. 7 . Schematic Diagram of Experimental Apparatus

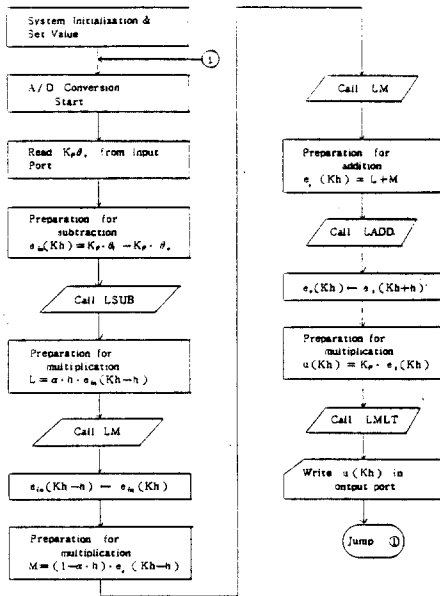


Fig. 8 . Flow Chart

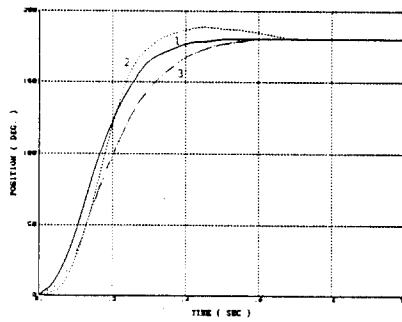


Fig. 9 . Position Error Prefiltered Proportional 制御 및 比例 制御時 K_p 變化에 따른 응답特性 比較 (實驗値)

- 1) $K_p = 0.15$
- 2) $K_p = 0.15, \alpha = 3H_z$
- 3) $K_p = 0.07, \alpha = 3H_z$

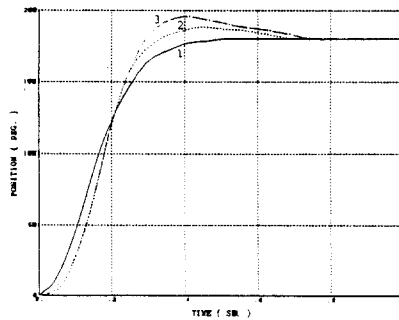


Fig. 10 . Position Error Prefiltered Proportional 制御 및 比例 制御時 필터의 주파수 크기에 따른 응답特性 比較 (實驗値)

- 1) $K_p = 0.15$
- 2) $K_p = 0.15, \alpha = 3H_z$
- 3) $K_p = 0.15, \alpha = 2H_z$