

전기-유압 서어보 시스템의 시간-지연 제어기 설계

김수홍 원상철
포항공과대학 전자전기공학과

Time-Delayed Feedback Controller Design
for a Electro-Hydraulic Servo System

Kim Soohong, Won Sangchul
Dept. of Electronic and Electrical Eng., POSTECH.

ABSTRACT

In this paper, a controller design for a electro-hydraulic servo system is presented. When state variables of the system are not directly measurable for feedback control, it is very difficult to satisfy the given requirements for the system output control. The proposed design method is based on the feeding back of the output variable and it's time delayed values.

1. 서 론

플랜트의 서어보 제어기를 설계할 경우 고전적인 방법은 주로 출력의 값을 비례관한 시키거나 출력 관환에 의한 PD, PI, PID제어기 또는 보상기를 설계하는 것이 대부분이다. 그러나 원하는 과도응답 특성을 얻을 수 있는 가장 좋은 방법은 상태변수 관환에 의해 임의의 위치에 극점을 할당하는 방법이다. 상태변수 관환을 하기 위해서는 시스템의 모든 상태변수를 측정할 수 있어야 하며 그렇지 못할 경우에는 상태 관측기를 구성하여 관측된 값을 관환 시켜야 한다. [1] 이 경우 상태 변수를 측정하기 위한 센서가 필요하며 관측기를 구성하는 경우에는 시스템이 복잡해지는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 모든 상태변수를 측정하지 않고 단지 시스템의 출력과 출력의 시간지연된 값들을 관한 시켜서 시스템의 과도응답특성을 개선 시킬 수 있는 시간-지연 제어기(Time-Delayed feedback controller)를 설계하여 전기-유압 서어보 시스템(Electro-Hydraulic Servo System)의 위치 제어에 이 제어기를 사용 하고자 한다.

일반적으로 전기-유압 서어보 시스템은 작은 구동장치에 의해 큰 힘을 낼 수 있으며 정확하고 빠른 응답특성을 가지고 있기 때문에 서어보 제어 복회 산업용 로봇이나 선박, 항공기등의 제어에 널리 사용되고 있다. [2][3] 이러한 전기-유압 서어보 시스템에 주로 사용되고 있는 비례제어기에 의한 시스템의 응답을 측정하고 제한된 시간-지연 제어기를 구성하여 이에 의한 시스템의 과도응답이 개선 되었음을 보였다. 또한 전기-유압 서어보 시스템에 흔히 나타나는 클로킹 마찰력에 의한 정상상태 오차를 개선하기 위해 적분기가 부가된 시간-지연 제어기를 설계하였다.

II. 전기-유압 서어보 시스템의 모델링과 해석 [3]

그림 1과 같은 서어보 밸브-모터 시스템에서 서어보 밸브 스푸울(spool)의 변위 $x(t)$ 와 토오크 모터의 입력전류 $i(t)$ 사이의 관계는 식 (II-1)과 같이 표시할 수 있다.

$$K_s \omega_s^2 i(t) = \ddot{x}(t) + 2\zeta_s \omega_s \dot{x}(t) + \omega_s^2 x(t) \quad (II-1)$$

여기서 ζ_s 는 서어보 밸브의 댐핑 계수이고 ω_s 는 고유 진동수이다.

공급압력 P_s 가 일정하고 배출압력이 0, 그리고 밸브 오리피스(orifice)의 면적이 스푸울의 변위 $x(t)$ 에 비례한다고 가정하면 2-stage 4-way 서어보 밸브의 오리피스들 통과하는 유량은 다음과 같다.

$$Q_1 = \sqrt{2K_{v1}} x(t) \sqrt{P_s - P_1} \quad (II-2)$$

$$Q_2 = \sqrt{2K_{v2}} x(t) \sqrt{P_2} \quad (II-3)$$

이상적인 zero-lap 4-way 밸브인 경우에 다음의 부하 유량식이 성립한다.

$$Q_L = K_{vL} x(t) \sqrt{P_s - P_L} \quad (II-4)$$

일반적으로 서어보 밸브의 고유 진동수는 유압 모터의 고유 진동수에 비해서 매우 크기때문에 식 (II-1)은 다음과 같이 근사화 된 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_{vL} i(t) \approx x(t) \quad (II-5)$$

따라서 식 (II-4)의 부하유량 Q_L 는 아래와 같다.

$$Q_L = K_{vL} K_{vL} i(t) \sqrt{P_s - P_L} \quad (II-6)$$

식 (II-6)에 나타난 것과 같이 오리피스의 유량 관계식은 비선형 특성을 나타내므로 이 식을 동작점에 대하여 선형화하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$Q_L = \frac{\partial Q_L}{\partial i} \Big|_{i(t)} + \frac{\partial Q_L}{\partial P_L} \Big|_{P_L} \\ = C_1 i(t) + C_2 P_L \quad (II-7)$$

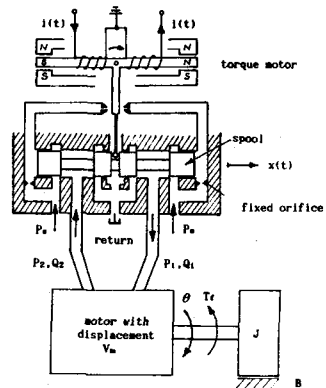


그림 1. 밸브-모터의 조합

여기서 C_1 는 유량이득, C_2 는 유량-압력계수이다. 유압 모터의 챔버(chamber)내에서의 유량 관계식은 연속 방정식으로 부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$Q_L = V_m \dot{\theta}(t) + \frac{V_t}{4\beta} \dot{P}_L + C_{tm} P_L \quad (II-8)$$

모터와 부하 사이의 운동방정식은

$$V_m P_L = J \ddot{\theta}(t) + B \dot{\theta}(t) + T_f \quad (II-9)$$

여기서 J 는 모터와 부하의 관성 모멘트, B 는 모터와 부하의 점성 마찰계수이고 T_f 는 쿨롱마찰에 의한 외란 토모크이다.

식 (II-7) (II-8) (II-9)로 부터 다음과 같은 시스템의 전달함수를 얻을 수 있다.

$$s[s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2] \Theta(s) + \left\{ \frac{1}{J} s + \frac{C_t \omega_n^2}{V_m^2} \right\} T_f(s) = C_1 \omega_n^2 I(s) \quad (II-10)$$

단,

$$1 \gg C_t B / V_m^2, C_t = C_{tm} - C_2$$

$$\omega_n^2 \equiv \frac{4\beta}{V_t} \frac{V_m^2}{J}$$

$$\zeta \equiv \frac{C_t}{V_m} \sqrt{\frac{BJ}{V_t}} + \frac{B}{4V_m} \sqrt{\frac{V_t}{BJ}}$$

벨브 앞단에 있는 서어보 증폭기의 이득이 A 라면 벨브의 입력전류 $i(t)$ 와 서어보 증폭기의 입력전압 $v(t)$ 사이의 관계는 $i(t) = Av(t)$ 이므로 식(II-10)으로부터 모터의 각 변위 $\Theta(s)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\Theta(s) = \frac{AC_1 \omega_n^2 V(s) - [(1/J)s + C_t \omega_n^2 / V_m^2] T_f(s)}{s(s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)} \quad (II-11)$$

이 식의 블록 선도가 그림 2.에 나타나 있다.

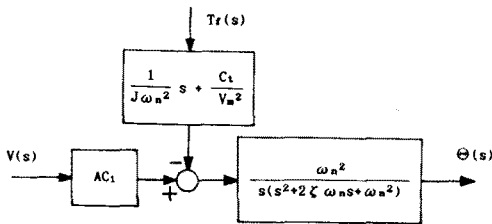


그림 2. 유압 서어보 시스템의 개 루프 블록선도

III. 시간-지연 제어기의 설계

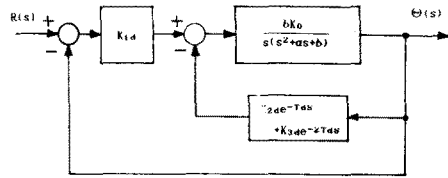
유압 서어보 시스템에 외란이 없다고 가정할 때 그림 3.과 같이 시스템의 출력과 출력의 시간 지연된 값을을 궤환 시키는 제어기를 구성해 보자. 제어입력 $u(t)$ 는

$$u(t) = K_{1d} r(t) - K_{1d} \theta(t) - K_{2d} \theta(t-T_d) - K_{3d} \theta(t-2T_d) \quad (III-1)$$

여기서 $r(t)$ 는 기준입력이고 K_{1d}, K_{2d}, K_{3d} 는 궤환이득이다. 이 시스템의 폐루프 전달함수는 식 (III-2)로 주어진다.

$$G_d(s) = \frac{bK_0 K_{1d}}{\Delta_d(s)} \quad (III-2)$$

$$\Delta_d(s) = s^3 + as^2 + bs + bK_0 K_{1d} + bK_0 K_{2d} e^{-T_d s} + bK_0 K_{3d} e^{-2T_d s}$$



$$a = 2\zeta \omega_n, \quad b = \omega_n^2, \quad K_0 = AC_1$$

그림 3. 시간-지연 궤환 제어 시스템의 블록선도

여기서 지연시간 $T_d > 0$ 이고 시간지연의 수는 개루프 시스템의 차수보다 하나 적게 한다.

(III-2)의 식은 지수항이 포함되어 있기 때문에 폐루프 시스템의 극점의 갯수는 무한개가 되어 시스템의 해석이 매우 어려워진다. 그러나 지연 시간 T_d 가 충분히 작을 경우 개 루프 시스템의 차수와 같은 수의 극점들을 제외한 나머지 무한개의 극점들은 s -평면상의 임의의 수직축 α 의 좌측으로 이동시킬 수가 있으며 우세(dominant)한 극점에 의해 시스템의 동 특성이 결정될 수 있다. [4] (그림 4.) 따라서 원하는 폐루프 시스템의 응답특성이 나오도록 수직축 α 의 우측 평면의 원하는 곳에 우세한 극점을 위치시키는 궤환이득을 구해야 한다.

시간 지연 제어기의 설계순서는 다음과 같다.

- 1) 지연시간 T_d 와 수직축 α 의 값을 선택한다.
- 2) 원하는 응답 특성이 나오도록 우세(dominant)한 극점의 위치를 결정한다.
- 3) 우세한 극점의 값을 특성방정식에 대입하여 연립 방정식으로 부터 궤환이득의 값을 구한다.
- 4) 구해진 궤환이득과 지연시간으로부터 우세한 극점을 제외한 나머지 극점이 α 의 좌측에 오는가를 Rouché의 정리에 의해 확인 한다. 나머지 무한개의 극점이 α 의 우측에 있는 경우 지연시간 T_d 를 보다 적게 선택하고 궤환이득을 다시 구한다. 일반적으로 지연시간의 값과 궤환이득의 절대값이 커질수록 나머지 무한개의 극점은 s -평면상의 우측으로 접근해 온다. [5][6]

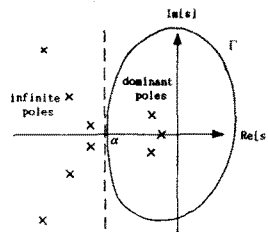


그림 4. 시간-지연 시스템의 극점의 위치

지금까지한 제어기의 설계는 시스템에 외란을 0 으로 가정한 경우였지만 전기-유압 서어보 시스템과 같은 실제의 시스템에는 외란 (이경우 쿨롱 마찰에 의한)이 존재하며 그 정확한 값을 측정 하기가 어렵다. 따라서 이러한 외란의 영향을 제거하기 위하여 시간-지연 궤환에 적분기를 부가한 새로운 제어기를 구성해 보면 그림 5.와 같다. 제어기의 제어입력 $u(t)$ 는

$$u(t) = K_{1d} \int (r - \theta) dt - K_{2d} \theta(t) - K_{3d} \theta(t-T_d) - K_{4d} \theta(t-2T_d) \quad (III-3)$$

여기서 $r(t)$ 는 기준입력이고 궤환이득 $K_{1d}, K_{2d}, K_{3d}, K_{4d}$ 는 앞에서 제시한 방법에 의해 구한다.

새로운 폐루프 시스템의 출력 $\Theta(s)$ 는 다음 식으로 표현된다.

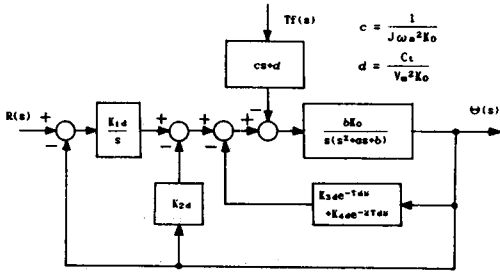


그림 5. 적분기가 부가된 시간-지연 계환 제어 시스템의 블록선도

$$\Theta(s) = \frac{bKoK1dR(s) - bKos[cs + d]Tr(s)}{\Delta(s)} \quad (圖-4)$$

$$\Delta(s) = s(s^3 + as^2 + bs + bKoK2d) + s(bKoK3ae^{-Tds} + bKoK4ae^{-2Tds}) + bKoK1d$$

기준입력 $r(t)$ 가 단위계단함수이고 외란 토오크 Tr 가 시간에 따라 변하지 않는다고 할때 시스템의 정상상태 오차 e_{ss} 는

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s[R(s) - \Theta(s)] = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\Delta(s) - bKoK1d + bKos(cs + d)}{\Delta(s)} = 0 \quad (圖-5)$$

따라서 일정한 외란 토오크에 의한 출력응답의 정상상태 오차는 적분기에 의해 제거될 수 있다.

IV. 실험 및 결과

제한된 시간-지연 제어기에 의한 유압 서어보 위치 제어시스템의 응답이 비례 제어기나 속도 보상기를 가진 비례 제어기에 의한 시스템의 응답특성보다 개선 되었음을 보이기 위해 EHS-160 유압 서어보 시스템을 사용하여 실험하였다. 각 제어기의 구조는 그림 6.과 같다.

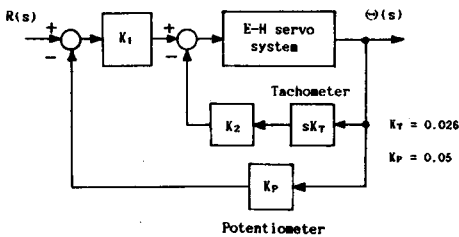


그림 6. (a) 속도 보상기가 있는 비례제어 시스템 구성도

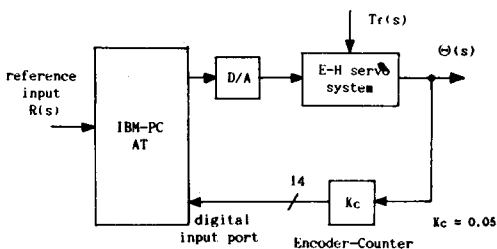


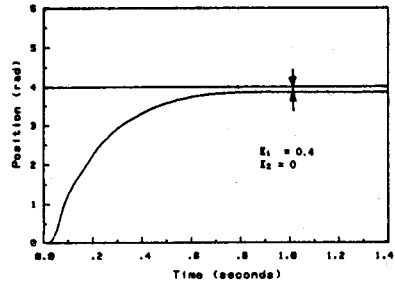
그림 6. (b) 시간-지연 계환 제어 시스템의 하드웨어 구성도

속도보상기를 가진 비례제어기를 구성하는 경우 각변위와 속도를 측정하기 위하여 전위차계와 타코미터를 사용하였다. 시간-지연 제어기는 IBM-PC/AT를 이용해서 구현하였으며 실시간 처리가 가능하게 하기 위하여 제어 프로그램은 80286어셈블리 언어에 의해 실행하였다. 여기서 지연 시간 T_d 는 10 msec 그리고 수직축의 값 α 는 -100으로 정했다.

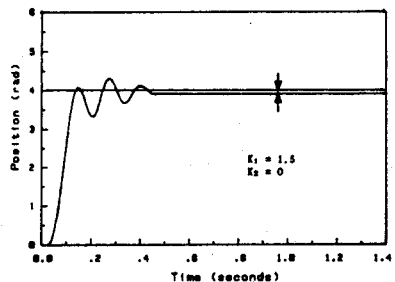
시간-지연 제어기를 구성하는 경우 유압 모터의 각 변위를 측정하기 위해서 전위차계 대신 엔코더(1200 pulses/rev)를 사용하였고 컴퓨터와의 인터페이스를 위해 Pc-Lab Card와 2진 계수기가 사용 되었다.

여기서 기준입력으로는 계단 입력이 사용되었고 출력의 목표값은 4 [rad], 그리고 시스템 파라미터 $a = 53.04$, $b = 2714.4$, $K_0 = 240$ 이다.

그림 7.은 속도보상기가 없이 비례제어만을 한 경우($K_2=0$)의 시스템의 응답으로 이득을 증가시킬수록 응답시간은 짧아지지만 오버슈트가 발생할을 볼수 있다. 그림 8.은 속도 보상기가 있는 비례제어기에 의한 응답이다. 시간-지연 제어기에 의한 시스템의 응답 특성은 그림 9.에 나와 있다. 빠른 응답시간에도 불구하고 비례제어기 또는 속도보상을 한 비례제어기에 나타나는 오버슈트가 제거 되었음을 볼 수 있다. 그러나 외란에 의한 정상상태 오차가 발생하게 되는 경우 이러한 정상상태 오차를 없애기 위해 적분기를 부가한 시간-지연 제어기에 의한 시스템의 응답은 그림 10.과 같다.

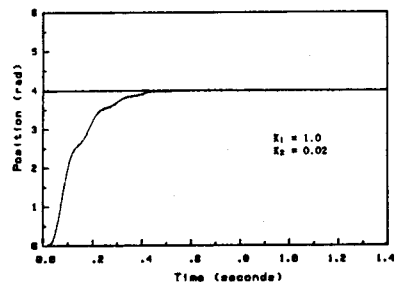


(a)

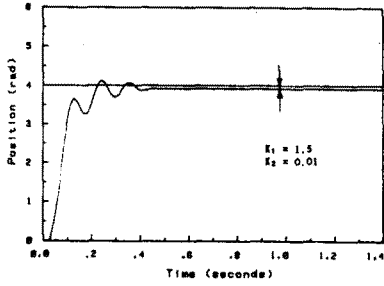


(b)

그림 7. 비례제어기에 의한 출력응답

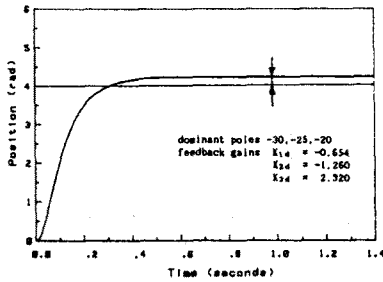


(a)

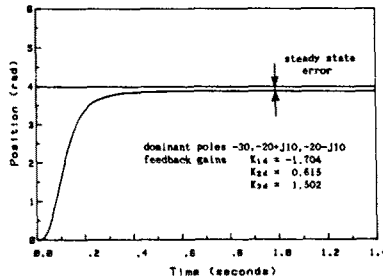


(b)

그림 8. 속도 보상기를 가진 비례제어기의 출력응답

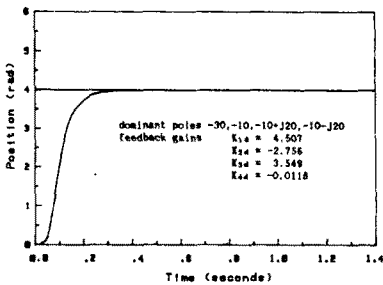


(a)

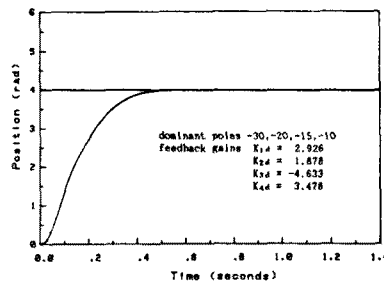


(b)

그림 9. 시간-지연 제어기에 의한 출력응답



(a)



(b)

그림 10. 정상상태 오차를 제거하기 위해 적분기가 부가된 시간-지연 제어기에 의한 출력응답

V. 결 론

본 논문에서는 전기-유압 서어보 위치 제어 시스템을 제어하기 위한 시간-지연 제어를 제안 하였다. 전기-유압 서어보 위치 제어 시스템에 시간-지연 제어를 마이크로 컴퓨터로 구성하여 비례 제어기나 속도 보상을 한 비례 제어기는 개선하기 힘든 시스템의 과도응답 특성을 주어진 범위 내에서 임의의 극점 지정 방법에 의해 개선 할 수 있음을 보였고 외란에 의한 시스템의 정상상태 오차를 적분기를 부가한 시간-지연 제어기에 의해 제거할 수 있음을 실험으로 확인 하였다.

VI. 참 고 문 헌

- [1] Kailath, T., "Linear Systems", Prentice-Hall, 1980.
- [2] Burrows, C.R., "Fluid Power Servomechanisms", VNR, 1972.
- [3] Viersma, T.J., "Analysis, Synthesis and Design of Hydraulic Servo Systems and Pipelines", Elsevier, 1980.
- [4] Kim, J.H., Chyung, D.H., "Delayed Feedback Optimal Controller", IFAC World Congress IX, Budapest, Hungary, July 1984.
- [5] Bellman, R., Cooke, K.L., "Differential- Difference Equations", Academic Press, 1963.
- [6] Manitius, A.Z., Olbrot, A.W., "Finite Spectrum Assignment Problem for Systems with Delays", IEEE Trans. Auto. Ctrl., Vol. AC-2, pp. 541-553, 1979.
- [7] Malek-Zavarei, M., Jamshidi, M., "Time Delay Systems Analysis, Optimization and Applications", North-Holland, 1982.
- [8] Nagrath, I.J., Gopal, M., "Control Systems Engineering", Wiley, 1982.
- [9] Astrom, K.J., Wittenmark, B., "Computer- Controlled Systems", Prentice-Hall, 1984.
- [10] Feedback Instruments, "Electro- Hydraulic Servomechanism Type ENS-160", Feedback, 1982.