

유압 서보계의 δ 연산자를 이용한 모델기준형적응제어

김기홍*, 윤일로**, 염만오***

Model Reference Adaptive Control Using δ -Operator of Hydraulic Servosystem

Ki Hong Kim*, Il Ro Yoon**, and Man Oh Yum***

ABSTRACT

The MRAC theory has proved to be one of the most popular algorithms in the field of adaptive control, particularly for practical application to devices such as an hydraulic servosystem of which parameters are unknown or varying during operation. For small sampling period, the discrete time system becomes a nonminimal phase system. The δ -MRAC was introduced to obtain the control performance of nonminimal phase system, because the z-MRAC can not control the plant for small sampling period

In this paper, δ -MRAC is applied to the control of an hydraulic servosystem which is composed of servovalve, hydraulic cylinder and inertia load.

Key Words : Hydraulic servosystem(유압 서보계), MRAC(모델기준형 적응제어), δ -operator(δ -연산자), Least square method(최소자승법), Nonminimal phase system(비최소 위상계) Identification error(동정오차), Parameter adjustment law(파라미터 조정칙)

기호설명

$t(z)$ = z-pulse transfer function of plant
 $t_d(z)$ = z-pulse transfer function of reference model
 $t(\delta)$ = δ -pulse transfer function of plant
 $t_d(\delta)$ = δ -pulse transfer function of reference model
 $\epsilon(k)$ = identification error
 $v(k)$ = reference input

1. 서론

유압 서보밸브에 의해 압력과 유량을 제어하는 유압 서보계는 무단변속이 가능하고 부하에 대응하는 힘과 운동 방향을 자유롭게 변동시켜며 고속, 고정밀도의 제어가 가능하기 때문에 각종 건설용 기계, 산업기계, 병기산업, 수중 매니플레이터 및 해저 작업차, 우주 항공산업, 자동화장치 등 많은 기계분야에 사용되고 있으며 그 응용분야가 점점 확대되고 있다^{(1),(2)}.

* 구미¹대학 기계설계전공
** 경남대학교 기계공학부 강사
*** 경남대학교 기계공학부

유압 서보계의 동특성을 향상시키기 위한 제어 기법으로써 제어 대상 플랜트의 동특성을 자동적으로 추정할 뿐만 아니라 플랜트의 파라미터가 바뀌는 경우에도 자동적으로 제어기의 파라미터를 조정하여 항상 요구하는 제어 출력을 얻을 수 있는 기준모델형 적응제어(이하 MRAC)에 대한 관심이 고조되고 있으며, 유압 서보계에 MRAC를 적용하는 연구가 보고되고 있다⁽³⁾.

MRAC를 이용하여 플랜트를 제어할 때 일반적으로 디지털 제어를 이용하는데 연속시간에서는 최소위상 계이더라도 플랜트 전달함수에서 분모와 분자의 차수 차가 2차 이상인 경우에 샘플링시간을 매우 짧게 하면 이산화에 의한 불안정 영점이 발생하여 이산시간계는 비최소위상이 된다⁽⁴⁾.

MRAC는 플랜트의 영점이 제어기의 극점이 되므로 플랜트가 비최소위상 계인 경우에는 제어가 불가능하다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 δ -연산자를 이용한 MRAC(이하 δ -MRAC)가 제안되고 있다.

δ -MRAC를 유압 서보계에 적용한 연구로서, Fuzheng Hu 등⁽⁵⁾은 가변용량형 피스톤 펌프의 토출압력을 제어할 때 발생되는 비최소위상 문제를 해결하여 양호한 모델 추종성능을 얻었고, 山橋浩三 등⁽⁶⁾은 관성부하가 장착된 유압 서보모터를 제어할 때 짧은 샘플링시간에 대해서도 제어가 가능함을 발표하였다.

본 연구에서는 MRAC를 적용하여 제어 할 때 비최소위상 계가 되어 제어가 불가능한 유압 서보계에 대해 δ -MRAC를 적용하였다. δ -MRAC을 이용할 때 특히 짧은 샘플링시간에서 공급압력이 변동하는 경우에도 제어가 가능함을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 실시하여 확인하였다. 이때 MRAC 제어기의 미지 파라미터를 조정하기 위한 파라미터 조정법칙은 최소자승법을 이용하였다.

2. 이론해석

2.1 유압 서보계의 모델링

유압 서보계를 모델링을 하기 위한 개략도는 Fig. 1과 같다.

제어입력 $u(t)$ 는 식(1)과 같다.

$$u(t) = r(t) - K_f y(t) \quad (1)$$

여기서, $r(t)$ 는 기준입력, K_f 는 변위 변환기의 계인, $y(t)$ 는 플랜트의 출력이다.

서보밸브를 구동하는 입력전류 $i_s(t)$ 는 식(2)와 같다.

$$i_s(t) = K_a u(t) \quad (2)$$

여기서, K_a 는 서보증폭기의 계인이다.

서보밸브의 운동방정식은 식(3)과 같다.

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 x_v(t)}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dx_v(t)}{dt} + x_v(t) = K_i i_s(t) \quad (3)$$

여기서, ω_n , ζ 은 서보밸브의 공진주파수와 감쇠계수, $x_v(t)$ 는 스톱의 변위, K_i 는 토크모터의 계인이다.

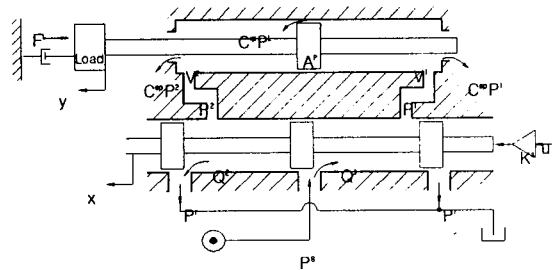


Fig. 1 Schematic Diagram of Hydraulic Servosystem

서보밸브의 스톱이 대칭이며 임계중립이라면 서보밸브에서의 부하유량식은 식(4)와 같다.

$$Q_L(t) = c_d u x_v(t) \sqrt{\frac{P_s - P_L(t)}{\rho}} \quad (4)$$

여기서, c_d 는 유량계수, w 는 밸브포트의 단면적 구배, ρ 는 작동유의 밀도, Q_L 부하유량이다.

유압 실린더의 부하유량식은 식(5)와 같다.

$$Q_L(t) = A_p \frac{dy(t)}{dt} + C_{\phi} P_L(t) + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{dP_L(t)}{dt} \quad (5)$$

여기서, A_p 는 실린더의 단면적, V_t 는 유로의 전체체적, β_e 는 작동유의 체적탄성계수, C_{ϕ} 는 전체 누유량이다.

피스톤의 운동방정식은 식(6)과 같다.

$$A_p P_L(t) = M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + B_f \frac{dy(t)}{dt} + L y(t) \quad (6)$$

여기서, M 은 관성질량이고 B_f 는 점성마찰계수, L 은 스프링상수이다.

서보밸브의 동특성을 비례요소로 고려하고 부하압력 유량식을 동작점 근방에서 테일러 급수전개하여 1차항만을 취하며, 유압 실린더의 외부누설과 작동유의 압축성을 무시하면 2차계의 연속시간 전달함수 $f(s)$ 은 식(7)과 같다.

$$f(s) = \frac{\beta}{s^2 + \alpha s} \quad (7)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{1}{M} (B_f + \frac{A_p^2}{k_2}), \quad \beta = \frac{k_1 K_a K_p A_t}{M},$$

$$k_1 = C_d w \sqrt{\frac{P_s - P_L^*}{\rho}}, \quad k_2 = \frac{C_d w z_v^*}{2 \sqrt{\frac{P_s - P_L^*}{\rho}}}$$

이다.

식(7)을 이산시간 전달함수 $f(z)$ 로 변환하면 식(8)과 같다.

$$f(z) = \frac{r_1 z + r_0}{z^2 + p_1 z + p_2} \quad (8)$$

z -변환과 δ -변환과는 $\delta = \frac{z-1}{T_s}$ 의 관계이므로 식(8)을 δ -펄스 전달함수 $f(\delta)$ 로 변환하면 식(9)와 같다.

$$f(\delta) = \frac{r_{\delta 1} \delta + r_{\delta 0}}{\delta(\delta + p_{\delta 1})} \quad (9)$$

여기서,

$$p_{\delta 1} = \frac{1 - e^{-\alpha T_s}}{T_s}, \quad r_{\delta 0} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{1 - e^{-\alpha T_s}}{T_s} \right),$$

$$r_{\delta 1} = \frac{\beta}{\alpha^2 T_s} (\alpha T_s + e^{-\alpha T_s} - 1)$$

이다.

2.2 기준모델의 설계

본 연구에서 기준모델은 전기유압 서보계의 전달함수와 동일한 차수인 2차계의 감쇠 진동계가 되도록 구성한다. 스텝입력에 대해 플랜트의 출력이 오버슈트가 발생하면 바람직하지 않기 때문에 $\zeta = 1$ 로 하여 기준모델을 식(9)와 같이 설계하였다.

$$t_d(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

여기서, ω_n 은 기준모델의 고유진동수이다.

식(9)를 이산화하면 식(10)과 같다.

$$t_d(z) = \frac{r_{d1} z + r_{d0}}{z^2 + p_{d1} z + p_{d0}} \quad (10)$$

식(10)의 이산시간 전달함수를 δ -변환하면 식(11)과 같다.

$$t_d(\delta) = \frac{r_{d\delta 1} \delta + r_{d\delta 0}}{\delta^2 + p_{d\delta 1} \delta + p_{d\delta 0}} \quad (11)$$

여기서,

$$r_{d\delta 0} = \frac{1 - 2e^{-\omega_n T_s} + e^{-2\omega_n T_s}}{T_s^2}$$

$$r_{d\delta 1} = \frac{1 - e^{-\omega_n T_s} - \omega_n T_s e^{-\omega_n T_s}}{T_s}$$

$$p_{d\delta 0} = \frac{1 - 2e^{-\omega_n T_s} + e^{-2\omega_n T_s}}{T_s^2}$$

$$p_{d\delta 1} = \frac{2(1 - e^{-\omega_n T_s})}{T_s} \quad \text{이다.}$$

2.3 δ -연산자에 의한 적응 제어계의 설계

유압 서보계의 δ -펄스 전달함수 $f(\delta)$ 와 기준모델의 δ -펄스 전달함수 $t_d(\delta)$ 는 식(12), (13)과 같다.

$$f(\delta) = \frac{r_{\delta 1} R(\delta)}{P(\delta)} \quad (12)$$

$$t_d(\delta) = \frac{r_{d\delta 1} R_d(\delta)}{P_d(\delta)} \quad (13)$$

다항식이 각각 $q(\delta) = \delta + q_0$, $f(\delta) = \delta + f_0$ 일 때 Diophantine 방정식은 식(14)와 같다.

$$k(\delta)((\delta^2 + p_{\delta 1}\delta) + h(\delta)(r_{\delta 1}\delta + r_{\delta 0})) = (\delta + q_0)[-r_{\delta 1}(\delta^2 + p_{\delta 1}\delta) + (\delta + f_0)(r_{\delta 1}\delta + r_{\delta 0})] \quad (14)$$

식(14)를 만족하는 다항식 $k(\delta)$, $h(\delta)$ 는 각각 $k(\delta) = k_0$, $h(\delta) = h_1\delta + h_0$ 이 되므로, 플랜트의 비최소 실현은 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned} y(k) &= r_{\delta 1} \frac{1}{\delta + f_0} u(k) + \frac{k_0}{(\delta + f_0)(\delta + q_0)} u(k) \\ &\quad + \frac{h_1\delta + h_0}{(\delta + f_0)(\delta + q_0)} y(k) \\ &= \Theta^T \Omega(k) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,

$$\Theta = [r_{\delta 1} \quad k_0 \quad h_1 \quad h_0]^T$$

$$\Omega(k) = [\Omega_1(k) \quad \Omega_2(k)]^T \\ = \left[\frac{1}{f(\delta)} u(k) \quad \frac{1}{f(\delta)} \omega(k) \right]^T$$

$$\omega(k) = [\omega_1(k) \quad \omega_2(k) \quad \omega_3(k)]^T \\ = \left[\frac{1}{q(\delta)} u(k) \quad \frac{\delta}{q(\delta)} y(k) \quad \frac{1}{q(\delta)} y(k) \right]^T$$

이다.

따라서, 플랜트의 출력 $y(k)$ 의 추정치 $\hat{y}(k)$ 는 식(16)과 같다.

$$\hat{y}(k) = \hat{\Theta}^T(k-1) \Omega(k) \quad (16)$$

여기서,

$$\hat{\Theta}(k) = [\hat{r}_{\delta 1}(k) \quad \hat{k}_0(k) \quad \hat{h}_1(k) \quad \hat{h}_0(k)]^T$$

이며, 가조정 파라미터이다.

동정오차 $\varepsilon(k)$ 는

$$\varepsilon(k) = \hat{y}(k) - y(k) \quad (17)$$

이고, 미지 파라미터를 조정하기 위한 파라미터 조정칙은 $k \rightarrow \infty$ 일 때 동정오차 $\varepsilon(k)$ 가 0이 되도록 즉, $\hat{\Theta}^T(k) \rightarrow \Theta^T$ 이 되도록 식(18)~식(20)의 최소자승법 알고리즘을 사용한다.

$$\hat{\Theta}(k) = \hat{\Theta}(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\xi(k)\varepsilon(k)}{1 + \xi^T(k)\Gamma(k-1)\xi(k)} \quad (18)$$

$$\Gamma(k) = \Gamma(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\xi(k)\xi^T(k)\Gamma(k-1)}{1 + \xi^T(k)\Gamma(k-1)\xi(k)} \quad (19)$$

$$\Gamma(-1) = \gamma I \quad (20)$$

단, γ 는 정수, I 는 단위행렬, $\Gamma(-1)$ 은 적응 계인 $\Gamma(k)$ 의 초기치를 나타낸다.

δ -MRAC를 달성하기 위한 제어입력 $u(k)$ 는 식(21)과 같다.

$$u(k) = \frac{1}{\hat{r}_{\delta 1}(k)} \{ -\hat{\theta}^T(k)\omega(k) + (\delta + f_0)t_d(\delta)v(k) \} \quad (21)$$

여기서, 미지 파라미터 $\hat{\theta}(k)$ 는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}(k) = [\hat{k}_0(k) \quad \hat{h}_1(k) \quad \hat{h}_0(k)]^T$$

Fig. 2는 δ -MRAC의 블록선도이다.

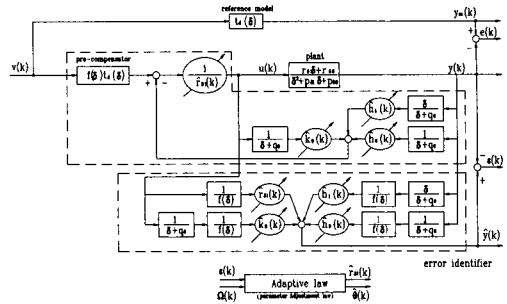


Fig. 2 Block diagram of δ -MRAC

3 시뮬레이션 및 실험

3.1 실험장치의 구성

본 연구에서의 제어대상 플랜트의 개략도는 Fig. 3에 나타내었다.

실험에 사용한 기기의 사양은 다음과 같다.

서보밸브: 동경정밀기계34-30L-30-14, 유압실린더: 세기 Double Acting Type, Potentiometer: MOOG A04955, 공급압력: 6.86MPa, AD&DA변환기: AXION Technology Co. AX5622B, Microprocessor: Pentium- 100MHz

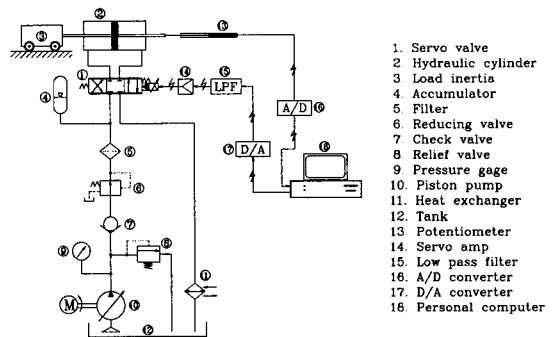


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

3.2 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션 및 실험은 유압 서보계에 대해 δ -MRAC를 적용하여 10ms이하의 샘플링시간에서 플랜트 출력의 추종성능을 확인한다. 또한, 플랜트

의 특성이 변동하는 경우의 제어성능을 확인하기 위해 공급압력을 변경한다.

MRAC 알고리즘 연산 및 A/D, D/A변환기의 동작에 사용한 언어는 Borland C++3.2이다.

기준모델은 식(22)와 같다.

$$G_d(s) = \frac{y_m(s)}{r(s)} = \frac{\omega_n}{s^2 + 2\omega_n s + \omega_n} \quad (22)$$

본 연구에서 사용한 규범입력과 기준모델의 출력은 Fig. 4에 나타내었다.

시뮬레이션에 사용한 플랜트의 주요 파라미터는 Table 1과 같다.

Table 1 Parameter of the electrohydraulic control system used in computer simulation

Parameter	Value
K_a	10 mA/V
ω	$35 \times 2\pi$ rad/s
w	0.2 cm
C_d	0.6
V_t	114 cm ³
β_e	76440 N/cm ²
ρ	84.96×10^{-7} kg/cm ³

시뮬레이션 및 실험에 사용한 제어기 파라미터의 초기치는 $\hat{\theta}(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$, $\Gamma(0) = 1000I$ 로 하였다. 플랜트 출력과 제어입력은 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$y = (\text{플랜트 출력}) / (5\text{cm}), \quad u = (\text{제어입력}) / (5\text{V})$$

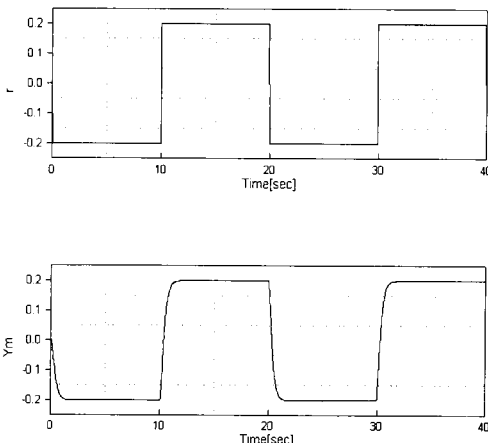
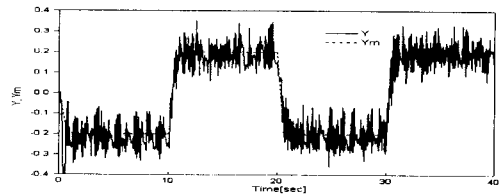


Fig. 4 Reference input and reference model output

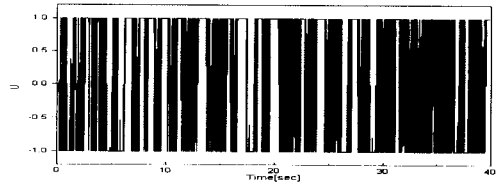
4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 전기유압 서보계에 z-MRAC를 적용한 실험결과이다. 이때 공급압력은 6.86MPa, 관성부하는 60kg, 샘플링 시간은 10ms이다.

Fig. 5(a)에서 플랜트는 진동하며 기준모델을 추종하지 못하고 있다. 이는 샘플링 시간 10ms에서 플랜트가 비최소위상계로 되기 때문이다.



(a) Output of reference model and plant



(b) Control input

Fig. 5 Experimental Result of MRAC

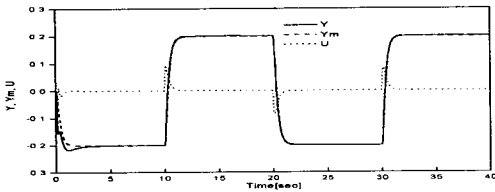
Fig. 6은 샘플링 시간10ms, 5ms, 1ms에서 δ -MRAC를 전기유압 서보계에 적용한 시뮬레이션 결과이다. Fig. 6 (a)의 초기응답에서 플랜트 출력은 8.8%의 오버슈트를 나타내며, 4.4초 이후부터 기준모델 출력에 일치하고 있다. Fig. 6 (b)의 초기응답에서 플랜트 출력은 5.9%의 오버슈트를 나타내며, 4초부터 기준모델 출력에 일치하고 있다. Fig. 6 (c)의 결과에서 플랜트 출력은 약 2.9%의 오버슈트를 발생하며, 2.8초에서 기준모델의 출력에 일치하고 있다.

Fig. 7은 시뮬레이션의 경우와 동일한 조건에서 δ -MRAC를 전기유압 서보계에 적용한 실험 결과이다. Fig. 7 (a)에서 플랜트 출력은 응답초기에 9.2%의 오버슈트가 발생하고, 매 주기의 과도응답에서 최대 0.08정도의 출력오차를 보이고 있다. Fig. 7 (b)에서 플랜트 출력은 7.4%의 오버슈트를 발생하

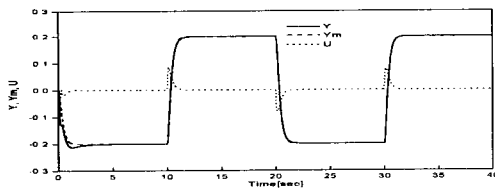
며, 6초에서 기준모델에 일치하고 있다. Fig. 7 (c)에서 플랜트 출력은 4.6%의 오버슈트를 발생하고, 5.5초부터 기준모델 출력에 일치하고 있다.

이상의 결과로부터 δ -MRAC가 전기유압 서보계에서 발생하는 비최소위상 문제를 해결하는데 유효한 제어기법임을 확인하였으며 또한 샘플링 시간을 짧게 하면 제어성능이 향상됨을 알 수 있다.

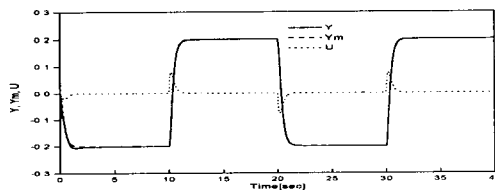
δ -MRAC 실험 결과에서의 오버슈트가 시뮬레이션의 경우보다 크게 나타났다. 이는 부하계에서의 마찰력과 서보밸브, 유압실린더에서의 누설 등으로 인한 모델링 오차에 기인한 것으로 생각된다.



(a) Sampling time=10ms



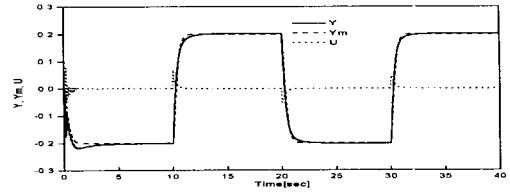
(b) Sampling time=5ms



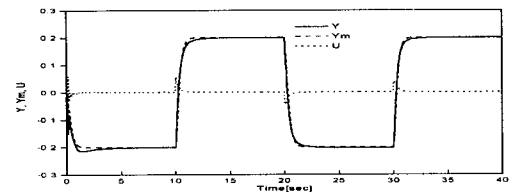
(c) Sampling time=1ms

Fig. 6 Simulation result of δ -MRAC

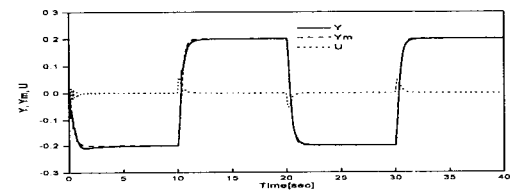
Fig. 8과 Fig. 9는 공급압력을 3.92MPa과 9.8MPa로 변화시켜 시뮬레이션과 실험을 행한 결과이다. 이때 샘플링 시간은 10ms이다.



(a) Sampling time=10ms



(b) Sampling time=5ms



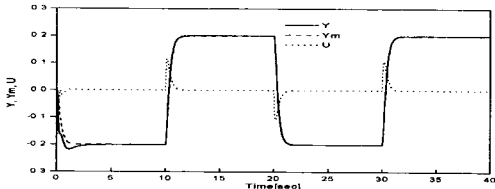
(c) Sampling time=1ms

Fig. 7 Experimental result of δ -MRAC

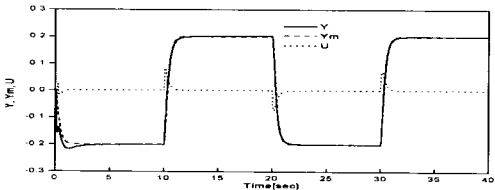
Fig. 8 (a)의 초기응답에서 플랜트 출력은 9.2%의 오버슈트를 발생하고 3.8초에 기준모델 출력에 일치하고 있다. Fig. 8 (b)에서는 8.6%의 오버슈트를 발생하고 4.8초에 기준모델에 일치한다.

Fig. 9 (a)에서 오버슈트가 9.1%이며, 정착시간은 3.8초이다. Fig. 9 (b)에서 초기응답에서 미소한 진동과 8.9%의 오버슈트를 발생하며, 4초에 기준모델에 일치하는 결과를 보이고 있다.

이상의 결과로부터 시뮬레이션 결과와 실험 결과는 잘 일치함을 알 수 있으며, 공급압력이 서로 다른 경우에도 제어성능은 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다. 따라서 δ -MRAC제어기는 외부환경 변동에 강인한 제어기법임을 알 수 있다.

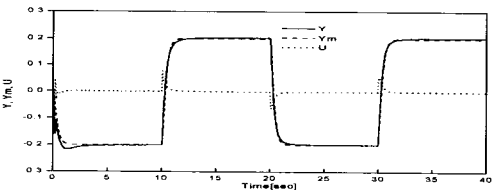


(a) Supply pressure=3.92MPa

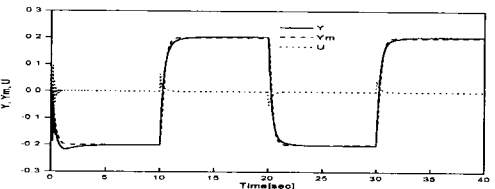


(b) Supply pressure=9.8MPa

Fig. 8 Simulation result of δ -MRAC



(a) Supply pressure=3.92MPa



(b) Supply pressure=9.8MPa

Fig. 9 Experimental result of δ -MRAC

5. 결론

연속시간계에서 최소위상인 전기유압 서보계를 이산시간 z-MRAC를 적용하여 짧은 샘플링 시간으로 제어하는 경우에 비최소위상이 발생하여 제어가 불가능하였다. 이 경우 전기유압 서보계에 δ -연산자를 이용한 MRAC를 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. MRAC를 이용하여 제어할 때 비최소 위상계가 되어 제어가 불가능한 유압 서보계에 대해 δ -MRAC를 이용하여 제어할 경우 우수한 추종성능을 얻었다.

2. δ -MRAC는 유압 서보계의 공급압력이 변동하여도 제어성능을 일정하게 유지할 수 있는 강인한 제어수법임을 확인하였다.

3. δ -MRAC 제어기를 이용하여 유압 서보계를 제어할 때 샘플링 시간이 플랜트의 제어성능에 영향을 미침을 확인하였다.

참고문헌

1. 池尾, "油壓システムに関する研究の狀態と展望," 油壓と空壓, 第21號, pp. 219-224, 1990.
2. J. Watton, "Fluid power systems," Prentice-Hall, 1989.
3. 金井, 内門, "ロバスト適應制御," 計測と制御, Vol. 26, No. 5, pp. 406-412, 1987.
4. K. J. Astrom, "Zeros of Sampled System," Automatica, Vol. 20, No. 1, pp. 31-38, 1984.
5. F.Hu and K.Edge, "Delta-operator based adaptive control of a piston pump," Fluid power, pp. 373-378, 1993.
6. 山橋, 池尾, 高橋, "適應制御理論の 電氣-油壓サボシステムへの應用," 油壓と空壓, 第21卷, 第7號, pp. 71-78, 1988.