

# 모델기준형 적응제어를 이용한 전기유압 서보계의 제어에 관한 연구

김기홍\*, 윤일노\*\*, 박재범\*\*, 김종걸\*\*\*, 염만오\*\*\*\*

## A Study on Control of Electrohydraulic Servosystem with Using Model Reference Adaptive Control Theory

K.H.Kim\*, I.R.Yun\*\*, J.B.PARK\*\*, J.K.Kim\*\*\*, M.O.Yum\*\*\*\*

### ABSTRACT

A model reference adaptive control(MRAC) theory is very useful for controlling a plant of which the parameters are unknown or vary during operation using only input-output signal of plant.

In this study, 2<sup>nd</sup> order discrete time MRAC controller is designed for an electrohydraulic position control system which is represented with nonlinear mathematical model and the least square method is adopted for the parameter adjustment law. This control algorithm is applied to the position control of electrohydraulic servosystem through computer simulation and the effect of the change of load, sampling time upon the performance following reference model and upon the performance of estimating plant parameters are examined.

**Key Words** : Model reference adaptive control(모델기준형 적응제어), Reference model(기준모델),

Electrohydraulic servosystem(전기유압 서보계), Parameter adjustment law(파라미터조정법칙)

### 1. 서론

생산합리화를 위한 자동조작, 원격조작을 비롯하여 제어계통의 조작단에서 고속정밀의 운동과 큰 힘을 얻을 수 있는 유압장치는 성능이 우수하여 병기산업, 우주 항공산업의 동력전달장치와 자동조향장치는 물론 일반산업기기 및 공작기계 등에 그 활용이 급속히 증가하고 있다.<sup>(1)~(3)</sup>

이에따라 유압장치에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으며<sup>(4)~(7)</sup> 특히 최근에는 운전조건에 의해 플랜트의 파라미

터가 변동하는 경우, 플랜트의 동특성 파악이 어려워져서 파라미터가 미지인 경우에도 기준모델의 출력에 플랜트의 출력이 일치하도록, 제어입력을 결정하는 제어기법인 모델기준형 적응제어(MRAC)이론에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(8)~(10)</sup>

MRAC는 제어기의 파라미터를 조정하는 방법<sup>(8),(10)</sup>에 따라 직접법과 간접법으로 나누어지는데, 가조정 파라미터를 사용하여 제어장치를 구성하고, 플랜트와 기준모델 간의 출력오차에 대하여 직접 가조정 파라미터를 조정함

\* 동명중공업(주) 기술연구소  
 \*\* 경남대학교 기계공학과 대학원  
 \*\*\* 연암공업전문대학 기계설계과  
 \*\*\*\* 경남대학교 기계공학과

으로써 필요한 제어입력을 결정하는 직접법이 많이 적용되고 있다.

MRAC를 전기유압 서보계에 적용한 연구로써, Yamahashi<sup>(11),(12)</sup>는 고정계인법과 최소화승법을 이용하여 관성부하와 적응계인을 변화시켜 실험 및 시뮬레이션을 하였으며, 샘플링주기와 관련되는 비최소위상(nonminimum phase)문제<sup>(13)</sup>에 대한 해결책을 제시하였고, Inoue<sup>(14)</sup>는 전기유압 서보모터계에 단순 위치 피드백과 간접법 MRAC 이론을 바탕으로 제어기를 설계하여 관성부하와 작동유온의 변화에 따른 계의 제어성능을 검토하였으며, Matsumoto<sup>(15)</sup>는 강인한 적응제어법을 적용하여 2자유도 전기유압 서보계의 위치제어에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다.

위의 연구 내용들은 비선형 방정식으로 모델링된 플랜트를 선형화하여 시뮬레이션을 실시함으로써, 플랜트의 비선형요소를 모델링에 포함시킬수 없으며, 파라미터 변화가 플랜트에 미치는 영향을 직접적으로 확인하기 어렵고 동작점을 벗어난 곳에서는 선형화에 의한 오차가 크다는 단점이 있다.

본 연구에서는 전기유압 서보계에 직접법 MRAC를 적용하여 위치제어를 할때 플랜트의 비선형 방정식을 그대로 사용하여 관성부하의 크기, 샘플링 주기, 플랜트가 동작중에 발생하는 부하의 변동등이 플랜트의 기준모델 추종성능에 미치는 영향을 검토하였다. 서보밸브를 비례요소로 간주<sup>(16),(17)</sup>하고 작동유의 압축성을 무시하여 2차계에 대한 이산시간 MRAC제어기를 설계하고 이 제어기를 비선형 방정식으로 모델링된 플랜트에 연결한 후, 매 샘플링 주기에 계산된 제어입력에 의해 플랜트는 연속시간 영역에서 동작하도록 구성하여 실제 플랜트에 적용할 경우와 동일하도록 하였다. 제어기는 Landau가 제안한 방법<sup>(18),(19)</sup>으로 설계하였으며, 파라미터 동정(Identification)을 위한 동정법칙은 최소화승법을 사용하였다.

## II. 전기유압 서보계의 이론해석

### 2.1 수학적 모델링

Fig.1은 전기유압 서보계의 개략도로써, 서보증폭기, 서보밸브, 유압실린더, 부하계로 구성되었다.

그림에서 서보증폭기로 입력되는 제어입력  $u(t)$ 는 식(1)과 같다.

$$u(t) = K_f r(t) \tag{1}$$

여기서,  $r(t)$ 는 기준입력,  $K_f$ 는 변위 변환기의 이득이다.

제어입력  $u(t)$ 는 서보증폭기에서 증폭되어 식(2)와 같은 크기의 전류  $i_s(t)$ 로 변환된다.

$$i_s(t) = K_a u(t) \tag{2}$$

여기서,  $K_a$ 는 서보증폭기의 이득이다.

서보밸브에 입력되는 전류  $i_s(t)$ 는 토크모터를 통해 서보밸브의 스톱을 구동시키며 이로 인한 서보밸브 스톱의 변위  $z(t)$ 는 식(3)과 같이 2차계로 모델링 된다.<sup>(16)</sup>

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + 2\zeta \frac{1}{\omega_n} \frac{dz(t)}{dt} + z(t) = K_t i_s(t) \tag{3}$$

여기서,  $\omega_n$ 은 서보밸브의 공진주파수,  $\zeta$ 는 서보밸브의 감쇠계수,  $K_t$ 는 토크모터의 이득이다.

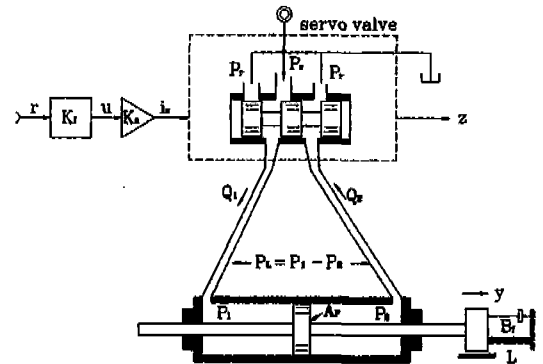


Fig.1 Schematic Diagram of Electrohydraulic Servosystem.

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

$$Q_L(t) = K_z z(t) \text{sgn}(P_s - P_L(t)) \sqrt{|P_s - P_L(t)|} \tag{4}$$

여기서,  $Q_L(t)$ 는 부하유량,  $K_z$ 는  $c_d w \sqrt{1/\rho}$ ,  $c_d$ 는 유량계수,  $w$ 는 밸브포트 단면적구배,  $\rho$ 는 작동유의 밀도,  $P_s$ 는 공급압력,  $P_L(t)$ 는 부하압력이다.

기름의 압축성을 고려하고 누설이 없다고 가정하면 액츄에이터의 부하 유량방정식은 식(5)와 같다.

$$Q_L(t) = A_p \frac{dy(t)}{dt} + \frac{V_t}{4K_m} \frac{dP_L(t)}{dt} \quad (5)$$

여기서  $A_p$ 는 실린더의 단면적,  $V_t$ 는 유로의 체적,  $K_m$ 은 기름의 체적탄성계수이다.

한편 부하계를 포함한 피스톤의 운동방정식은 스프링 부하를 무시하면 식(6)과 같다.

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

여기서,  $M$ 은 관성질량이고  $B_f$ 는 점성계수이다.

### 2.2 연속시간 전달함수 및 이산화

MRAC 제어기는 대상 플랜트의 연속시간 전달함수를 근거로 하여 설계를 하는데 이때 전달함수의 분모 및 분자다항식의 차수를 알아야 한다. 이를 위해서 식(3), (4), (5)에서 서보밸브를 비례요소로 간주하고, 서보밸브의 부하 유량방정식을 동작점 ( $z^*, P_L^*$ ) 근방에서 테일러급수 전개하여 1차항만 취하며, 작동유의 압축성을 무시하면 식(7)과 같은 전기유압 서보계의 전달함수를 구할 수 있다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{A_2 s^2 + A_1 s} \quad (7)$$

여기서,

$$A_2 = k_2 M, \quad A_1 = k_2 B_f + A_p^2, \quad K = k_1 K_t K_a A_p,$$

$$k_1 = K_2 \sqrt{P_s - P_L^*}, \quad k_2 = K_2 z^* / (2\sqrt{P_s - P_L^*}) \quad \text{이다.}$$

따라서 식(7)의 이산시간 전달함수  $G(q^{-1})$ 은 식(8)과 같다.<sup>(20)</sup>

$$G(q^{-1}) = \frac{b_0 + b_1 q^{-1}}{1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2}} = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad (8)$$

여기서,  $a_1 = -e^{\alpha T} - 1, \quad a_2 = e^{-\alpha T}$

$$b_0 = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)[T + (e^{-\alpha T} - 1)/\alpha]$$

$$b_1 = -e^{\alpha T} + \left(\frac{\beta}{\alpha^2}\right)(1 - e^{-\alpha T})^2$$

$$\alpha = \frac{A_1}{A_2}, \quad \beta = \frac{K}{A_2} \quad \text{이다.}$$

### III. 이산시간 MRAC 제어기 설계

일반적으로 스칼라 입출력계(single input-single output)를 대상으로 하는 모델기준형 적응제어는 제어목적, 제어방법 및 파라미터 동정방법에 따라 여러가지가 있으나 E.M.M(Exact Model Matching)에 파라미터 동정을 추가한 점에서 본질적으로는 동일한 특성을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 Laundau가 제안한 방법<sup>(18)</sup>을 근본으로하여 적응제어법칙을 구성한다.

#### 3.1 Exact Model Matching

전행 시불변 스칼라 입출력계의 이산시간 전달함수는 식(9)와 같다.

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d} B(q^{-1})u(k) \quad ; \quad d > 0 \quad ; \quad y(0) \neq 0 \quad (9)$$

여기서,

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_n q^{-n}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_m q^{-m} \quad ; \quad b_0 \neq 0$$

이며  $u(k), y(k)$ 는 각각  $k$ 시점에서 플랜트의 입출력 신호이고,  $d$ 는 플랜트의 지연시간이다.

희망하는 플랜트의 동특성을 규정하는 기준모델을 식(10)과 같이 정의한다.

$$A_M(q^{-1})y_m(k) = q^{-d} B_M(q^{-1})u_m(k) \quad (10)$$

여기서,

$$A_M(q^{-1}) = 1 + a_{m1} q^{-1} + a_{m2} q^{-2} + \dots + a_{mn} q^{-n}$$

$$B_M(q^{-1}) = b_{m0} + b_{m1} q^{-1} + b_{m2} q^{-2} + \dots + b_{mm} q^{-m}$$

이며  $u_m(k)$  및  $y_m(k)$ 는 각각 기준모델의 입출력신호,  $A_M(q^{-1})$ 은 점근 안정다항식,  $b_{m0} \neq 0$ 으로 한다.

한편, MRACS를 설계하는데 있어서 제어입력  $u(k)$ 로 신호의 미래치가 사용되는 것을 피하기 위하여 다음과 같은 조건이 필요하다.

$$n_1 - m_1 \geq n - m \quad (11)$$

플랜트와 기준모델의 출력오차를

$$e_1(k) = y_m(k) - y(k) \quad (12)$$

로 정의하면, 제어의 목적은  $k \rightarrow \infty$  일때 출력오차  $e_1(k) \rightarrow 0$  이 되도록 제어입력  $u(k)$  을 결정하는 것이다.

$n$ 차의 모닉(mononic) 안정다항식  $D(q^{-1})$ 을 도입하면 식(13)의 Diophantine<sup>(21)</sup>방정식을 만족하는 다항식  $R(q^{-1})$ ,  $H(q^{-1})$ 를 유일하게 결정할 수 있다.

$$D(q^{-1}) = A_s(q^{-1})R(q^{-1}) + q^{-d}H(q^{-1}) \quad (13)$$

여기서,  $R(q^{-1}) = 1 + r_1q^{-1} + \dots + r_{d-1}q^{-(d-1)}$   
 $H(q^{-1}) = h_0 + h_1q^{-1} + \dots + h_{n-1}q^{-(n-1)}$   
 $D(q^{-1}) = 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_nq^{-n}$  이다.

식(13)의 양변에  $y(k)$ 를 곱하고 식(9)를 대입하여 정리하면 식(14)와 같다.

$$D(q^{-1})y(k) = \theta^T \xi(k-d) \quad (14)$$

여기서,  $\theta^T = [b_0 \ b_0r_1 + b_1 \cdot b_m r_{d-1} \ h_0 \ h_1 \cdot h_{n-1}]$   
 $\xi^T(k) = [u(k) \ u(k-1) \ \dots \ u(k-m-d+1)$   
 $y(k) \ y(k-1) \ \dots \ y(k-n+1)]$  이다.

한편, 식(12)를 이용하여 출력 오차방정식을 유도하면 식(15)와 같다.

$$D(q^{-1})e_1(k+d) = -b_0u(k) - \bar{\theta}^T \bar{\xi}(k) + D(q^{-1})y_m(k+d) \quad (15)$$

여기서,  $\theta^T = [b_0, \bar{\theta}^T]$ ,  $\xi^T(k) = [u(k), \bar{\xi}^T(k)]$ 이다.

제어의 목적인  $y(k) \rightarrow y_m(k)$ 을 얻기 위해 식(15)에서  $D(q^{-1})e_1(k+d) = 0$ 로 하면 제어입력  $u(k)$ 는 식(16)과 같다.

$$u(k) = \frac{1}{b_0} \{D(q^{-1})y_m(k+d) - H(q^{-1})y(k) - B_F(q^{-1})u(k)\} \quad (16)$$

여기서,  $B_F(q^{-1}) = B(q^{-1})R(q^{-1}) - b_0$ 이다.

이산시간계에 대한 Exact Model Matching 제어에 대한 블록선도는 Fig.2와 같다.

### 3.2 직접법에 의한 모델기준형 적응제어기 설계

플랜트의 파라미터를 모르는 경우에는 식(16)의 파라

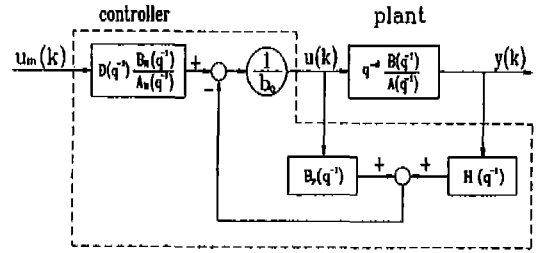


Fig. 2 EMM control of discrete time system

미터가 미지이므로 이를 동정하는 방법에 의해 적응제어기를 설계하는데 제어입력  $u(k)$ 는 식(17)과 같다.

$$u(k) = \frac{1}{\hat{b}_0(k)} \{D(q^{-1})y_m(k+d) - \hat{H}(q^{-1}, k)y(k) - \hat{B}_F(q^{-1}, k)u(k)\} \quad (17)$$

파라미터를 동정하는 파라미터 조정칙을 결정하기 위한 동정오차  $\epsilon_1(k)$ 는 식(18)과 같다.

$$\epsilon_1(k) = D(q^{-1})\hat{y}(k) - y(k) = \phi^T(k)\xi(k-d) \quad (18)$$

여기서,  $\phi(k) = \hat{\theta}(k) - \theta(k)$ ,  $\hat{y}(k)$ 는 플랜트 출력의 추정치이다.

이때 가조정 파라미터  $\hat{\theta}(k)$ 를 동정하기 위한 파라미터 조정칙은 최소자승법 알고리즘을 사용하면 식(19), (20)과 같다.

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) - \Gamma(k-1)\xi(k-d)\epsilon_1(k) \quad (19)$$

$$\Gamma(k) = \Gamma(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\xi(k-d)\xi^T(k-d)\Gamma(k-1)}{1 + \xi^T(k-d)\Gamma(k-1)\xi(k-d)} \quad (20)$$

여기서,  $\Gamma(0) = \Gamma^T(0) > 0$ 이다.

식(20)의 알고리즘을 구체적으로 실행하기 위해서는 동정오차  $\epsilon_1(k)$ 에  $k$  시점의  $\hat{\theta}(k)$ 를 포함하여 표현해야 하므로, 식(18)에 식(14) 및 식(19)을 대입하여 정리하면 식(21)과 같다.

$$\epsilon_1(k) = \frac{-D(q^{-1})y(k) + \hat{\theta}^T(k-1)\xi(k-d)}{1 + \xi^T(k-d)\Gamma(k-1)\xi(k-d)} \quad (21)$$

따라서 식(17)의 제어입력과 식(19)의 파라미터조정 칩을 사용하면 모델기준형 적응제어를 수행할 수 있다.

이산시간계에 대한 직접법 MRAC의 블록선도는 Fig.3 과 같다.

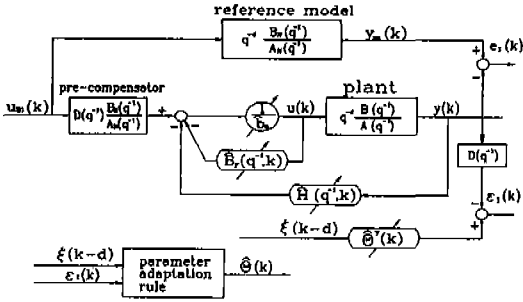


Fig. 3 Explicit MRAC of discrete time system

### 3.3 기준모델의 설계

MRAC에서 플랜트의 출력은 기준모델의 출력을 추종하므로 희망하는 플랜트의 동특성을 기준모델의 설계에 고려하여야 한다. 기준모델은 MRAC의 구축조건인 “기준모델 전달함수의 상대차수 ≥ 플랜트 전달함수의 상대차수”를 만족시키기 위해 0/2차 형태의 전달함수를 가지도록 식(22)와 같이 구성하였다.

$$G_M(s) = \frac{Y_m(s)}{U_m(s)} = \frac{K}{(s+i)(s+j)} \quad (22)$$

식(22)를 이산화하면 식(23)과 같다.<sup>(20)</sup>

$$\begin{aligned} G_M(q^{-1}) &= \frac{b_{m0}q^{-1} + b_{m1}q^{-2}}{1 + a_{m1}q^{-1} + a_{m2}q^{-2}} \\ &= \frac{B_M(q^{-1})}{A_M(q^{-1})} \end{aligned} \quad (23)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_{m1} &= -e^{iT} - e^{jT}, \quad a_{m2} = e^{-(i+j)T} \\ b_{m0} &= [K/(ij(i-j))] * [(i-j) - ie^{-jT} + je^{-iT}] \\ b_{m1} &= [K/(ij(i-j))] * [(i-j)e^{-(i+j)T} + je^{-jT} - ie^{-iT}] \end{aligned}$$

이다.

## IV. 컴퓨터 시뮬레이션 및 고찰

### 4.1 컴퓨터 시뮬레이션

MRAC를 적용하여 플랜트를 제어할 때 플랜트의 파라미터가 미지인 상태에서 단지 플랜트에 가해지는 제어입력과 출력신호만을 이용하여 MRAC제어기를 구성하여 제어의 목적을 달성할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 시뮬레이션을 실시하기 때문에 플랜트의 동특성과 동일하게 수학적으로 모델링된 계를 사용하여 플랜트의 출력신호를 구해야 한다.

시뮬레이션에 사용된 플랜트의 파라미터는 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters of the system used in computer simulation ( $P_1 = 70kg_f/cm^2$ )

Parameter	Value
$K_a$	10 mA/V
$\omega_n$	$35 \times 2\pi$ rad/s
$\zeta$	0.9
$k_1$	$1.4 \times 10^4$ cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> /cm
$k_2$	0.5 cm <sup>5</sup> /kg <sub>f</sub> s
$K_i$	$8.33 \times 10^{-4}$ cm/mA
$w$	2.6 cm
$K_z$	$1673$ cm <sup>3</sup> /√kg <sub>f</sub> s
$A_p$	3.3 cm <sup>2</sup>
$V_t$	120 cm <sup>3</sup>
$K_f$	2 V/cm
$C_d$	0.6
$K_m$	7800 kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
$B_f$	2.0 kg <sub>f</sub> s/cm
$\rho$	$8.67 \times 10^{-7}$ kg <sub>f</sub> s <sup>2</sup> /cm <sup>4</sup>

MRAC제어기는 이산시간 영역에서 작동하기 때문에 식(17)에 의해 계산된 제어입력  $u(k)$ 는 샘플링 시간동안 일정한 값으로 플랜트에 가해진다. 한편 연속시간 영역에서 작동되는 플랜트의 거동을 계산하기 위하여 4th order Runge-kutta method를 사용하여 수치계산을 하였다. 이때 시간증분은 0.001초로 계산하여 다음의 샘플링시간과 일치하는 시점에서 플랜트 출력을 MRAC제어기의 계산치에 피드백하여 다음 샘플링 시간에 가해질 새로운 제어입력을 결정한다.

### 4.2 고찰

관성질량이 20kg 작용하는 플랜트에 MRAC제어기의 샘플링 주기 T=0.08초, 적응게인 초기치  $\Gamma(0) = 1000I$

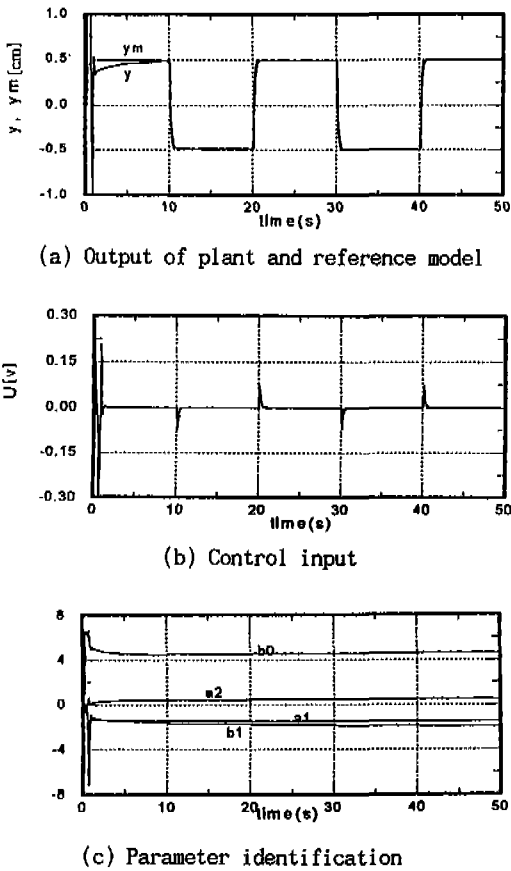


Fig.4 Simulation results of MRACS (M=20kg)

로 하여 운전할 때 플랜트의 출력이 기준모델의 출력에 일치하는 결과를 Fig.4-(a), 제어입력은 Fig.4-(b), MRAC 제어기의 가조정 파라미터가 동정하는 결과를 Fig.4-(c)에 각각 나타내었다. 운전초기에는 파라미터가 전혀 동정하지 않아서 플랜트의 출력이 심하게 변동하고 있으나 플랜트의 출력이 2번째 주기부터 기준모델의 출력에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

관성부하의 크기가 변할 경우 플랜트가 기준모델에 추종하는 성능을 검토하기 위해 Fig.4와 동일한 조건에서 40kg, 70kg의 관성질량을 장착했을 때의 플랜트 출력을 Fig.5-(a), Fig.5-(b)에 각각 나타내었다.

Fig.5-(a)에서 플랜트 출력은 관성질량이 20kg인 경우와 유사하게 기준모델에 양호하게 추종하지만 Fig.5-(b)의 경우에는 플랜트의 초기거동에서 심한 진동이 수반되며 기준입력의 크기가 바뀌는 매 주기의 초기상태에서

도 기준모델의 출력에 일치하지 못하고 있다. 이는 식(7)에서 알 수 있는 것과 같이 관성질량이 증가하면 플랜트의 고유진동수가 감소하여 우세극이 s-평면의 허수축으로 이동함으로써 비최소위상계가 되기 쉽다.<sup>(22)</sup> MRAC의

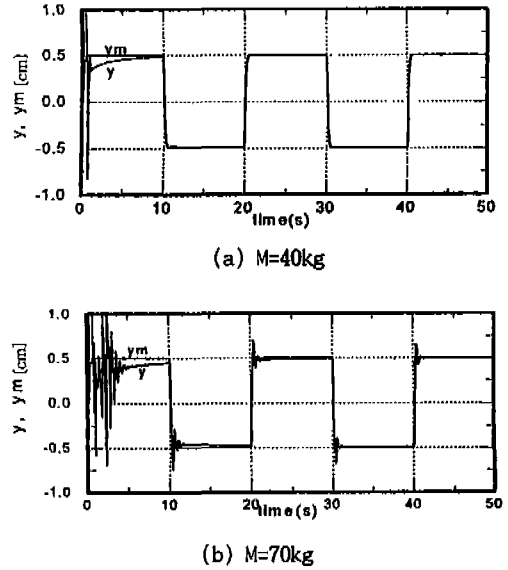


Fig. 5 Effect of inertial load

경우 플랜트의 영점이 제어기의 극점이 되므로 비최소위상계가 되면 제어기가 불안정하게 된다. 이와같이 플랜트의 고유진동수가 작아서 생기는 문제는 샘플링 주기를 작게 하면 해결될 수 있다.

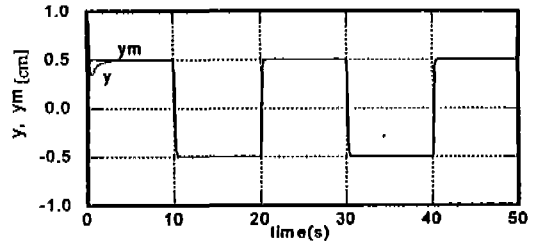


Fig. 6 Effect of sampling time (T=0.04s, M=70kg)

Fig.6은 Fig.5-(b)와 동일한 조건으로 샘플링 주기 T=0.04초로 한 결과이다. 제어기 파라미터의 동정횟수가 2배 많아지므로 인해 초기의 진동이 감소되며 기준모델의 출력에 대한 추종성능도 매우 양호한 결과를 보여주고 있다.

Fig.7은 샘플링 주기  $T=0.01$ 초로 했을때의 제어입력의 거동을 나타낸 것인데 제어입력이 불안정하게 진동을 하고 있다. 연속시간계에서는 최소위상이더라도 플랜트의 상대차수가 2차 이상인 경우에는 연속시간계를 이산화하여 디지털 제어를 할 때, 빠르게 제어하려고 샘플링 주기를 0에 가깝게 하면 불안정한 극한영점(limiting zero)이 발생하여 비최소위상계로 되고, 이로 인해 제어입력이 극한이 되므로 제어불능이 되기 때문으로 생각된다.<sup>(13)</sup>

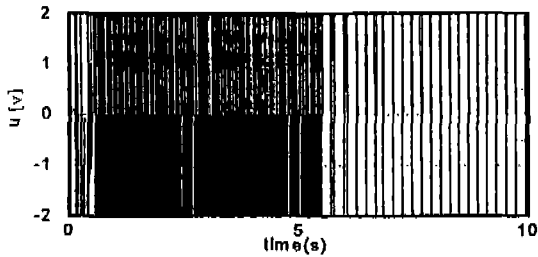


Fig. 7 Effect of sampling time( $T=0.01$ s,  $M=70$ kg)

Fig.8은 운전중의 부하 변동에 따른 플랜트의 추종성능을 확인하기 위하여 관성부하가 20kg인 상태에서 운전하고 있는 플랜트의 출력이 기준모델의 출력에 일치하는 시점(Fig.8 B점,  $T=20$ 초)에서 관성부하를 70kg으로 바꾸

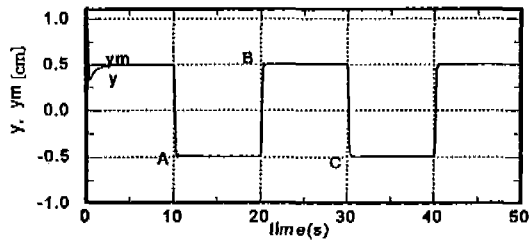


Fig. 8 Effect of load variation

고, 운전중에 유온상승을 고려하여 점성마찰계수를  $2Ns/m$ 에서  $1.5Ns/m$ 로 변경했을때의 결과이다.

부하를 변동시킨 직후의 과도응답(B점)에서 오버슈트가 발생하였는데 이는 부하변동으로 인하여 파라미터를 다시 동정하는 과정에서 발생한 것으로 보이며, 부하변동에 대해 파라미터가 다시 동정 완료된 다음 주기에서 플랜트의 과도응답(C점)은 기준모델의 출력에 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

## V. 결론

이산시간 MRAC제어기를 전기유압 서보계에 적용하여 관성부하, 점성부하, 샘플링주기의 변화가 전기유압 서보계의 기준모델 추종성능에 미치는 영향에 대해 시뮬레이션하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. MRAC제어기는 플랜트의 관성부하, 점성부하가 변동하여도 기준모델 추종성능이 양호함을 알 수 있었다.
2. 플랜트의 출력을 기준모델의 출력에 빠르게 추종시키기 위해서는 가능한 한 샘플링 주기를 짧게 하는 것이 바람직하지만 임계값이하로 하면 계가 비최소위상계로 되어 제어불능 상태로 되었다.
3. 운전도중 부하변동이나 작동유온의 상승으로 인하여 시스템의 동특성이 변하는 경우에도 플랜트가 기준모델을 잘 추종함을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

1. R.H.Maskery, W.J.Thayer, "Brief History of Electrohydraulic Servomechanisms", Moog Technical Bulletin 141, 1978.
2. H.E.Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc. 1967.
3. 花房秀郎, "油壓サーボ技術の發展とその動向", 機械の研究, 第33卷 第1號, pp7-14, 1981.
4. 김종결, "부하압력 피이드백을 이용한 전기유압 서보계의 특성개선에 관한 연구", 부산대학교 박사학위논문, 1992.
5. 정용길, "軸發電裝置用 油壓 電動 시스템의 定速制御에 關한 研究", 부산수산대학교 박사학위논문, 1994.
6. 이동권, "슬라이딩모드를 이용한 편로드 유압실린더의 추종제어 특성연구", 서울대학교 박사학위논문, 1990.
7. 하석홍, "슬라이딩모드에 의한 전기유압서보계의 제어 및 응용에 관한 연구", 부산대학교 박사학위논문, 1993
8. 市川邦彦, 金井喜美雄, 鈴木隆, 田村捷利, "適應制御", 昭晃堂, 1984.
9. 金井善美, "適應システム設計の基礎", 計測と制御, Vol.23, No.5, pp417-421, 1984.
10. I.D. Landau, M.Tomizuka, "適應制御システム

- 의理論と實際”, オーム社, 1981.
11. 山橋浩三, 池尾 茂, 高橋浩爾, “直接法モデル規範形適應制御理論の電氣-油壓サーボシステムへの應用”, 油壓と空氣壓, 第20卷, 第7號, pp. 71-78, 1988.
  12. 山橋浩三, 池尾 茂, 高橋浩爾, “適應制御理論の電氣-油壓サーボシステムへの應用”, 油壓と空氣壓, 第21卷, 第7號, pp. 688~695, 1990.
  13. K.J.Astrom et al., “Zeros of Sampled System”, Automatica, Vol.20, No.1, pp31-38, 1984.
  14. 井上雅史, 高橋浩爾, 池尾 茂, “モデル規範形適應制御理論の電氣油壓サーボシステムへの應用”, 油壓と空氣壓, 第18卷, 第6號, pp. 467~474, 1987.
  15. 松本, 中野, “電氣油壓サーボ系のロバスト化に関する比較検討”, 秋季油空壓講演會論文集, pp.141-144, 1994.
  16. W.J.Thayer, “Transfer function for Moog Servovalves”, Moog Technical Bulletin 103, 1965.
  17. 東京精密測器社, “TSS電氣-油壓サーボ弁取扱説明書”, 3Fシリーズサボ弁, 1990.
  18. I.D.Landau, R.Lozano, “Unification of Discrete Time Explicit Model Reference Adaptive control Design”, Automatica, Vol.17, pp. 593-611, July 1981.
  19. 金井喜美, “ロバスト適應制御入門”, オーム社, 1990.
  20. C.P.Neuman, C.S.Baradella, “Digital transfer functions for microcomputer control”, IEEE Trans., Systems, Man, and Cybernetics, Vol.smc-9, No.12, pp.856-860, 1979.
  21. 市川邦彦, “Exact Model Matchingの考え方”, 計測と制御, Vol.26, No.11, pp977-984, 1987.
  22. 김중식, “선형제어 시스템공학”, 청문각, 1988.