

적응제어를 이용한 유압 액추에이터의 특성개선에 관한 연구

염만오[#], 윤일로^{*}

A Study on the Characteristics Improvement of Fluid Power Actuator Using Adaptive Control

Man Oh Yum[#] and Il Ro Yoon^{*}

ABSTRACT

A hydraulic system is difficult to keep the performance due to non-linearity, load pressure which changes according to working condition and system parameter variation, the requirement of control algorithm has been risen in order to satisfy them. An adaptive control is a control method which is suggested to achieve a control object though plant characteristics change. In spite of the case that plant characteristics and the degree of variation are difficult to grasp, adaptive control can keep the characteristics of closed-loop system regularly.

In this study GMVAC(generalized minimum variance adaptive control) combined with output error feedback is proposed in order to solve problems of non-minimum phase, vibration and overshoot in initial response of the plant. The control performance according to the variation of characteristics of the plant is evaluated by changing the supply pressure only.

Key Words : Generalized minimum variance adaptive control (일반화최소분산 적응제어), Model reference adaptive control (모델규범형적응제어), Nonminimal phase system (비최소위상계), Reference model (규범모델), Exact model matching(모델매칭)

기호설명

$r(k)$ = reference input
 $u(k)$ = control input
 $y_m(k)$ = output of reference model
 $y(k)$ = output of plant
 λ = weight
 k_c = feedback gain of output error

1. 서론

전기유압 서보계는 다른 동력전달장치에 비해 응답성이 우수하며, 단위 중량당 출력비가 높고 외력에 대한 강성이 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 전기유압 서보계는 NC공작기계, 재료 및 진동시험기, 사출성형기 등의 주요 공정에 응용되고 있다.¹

접수일: 2003년 02월 03일; 게재승인일: 2003년 11월 14일

교신저자: 경남대학교 기계자동화공학부

E-mail: yummanoh@kyungnam.ac.kr Tel. (055) 249-2615

* 경남대학교 기술혁신센터 선임연구원

전기유압 서보계는 일반적으로 유압 액츄에이터-부하계로 표현되고, 동특성은 유압 시스템의 압력-유량관계나 부하계의 운동에 기인한 복잡하고 강한 비선형성을 내재하고 있다. 이러한 시스템의 제어기 설계에 대한 고전적인 접근 방법은 동작점 부근에서 시스템 동특성을 선형화하는 방법을 이용하고 있다.² 그러나 시스템 운전 중의 환경 변화, 예를 들면 액츄에이터의 공급압력, 관성질량, 점성마찰, 작동유 온도 등의 영향을 받아 시스템 파라미터가 변하는 경우에 PID제어, 극배치제어 등의 고전적 제어방식으로 항상 일정한 응답을 얻는데는 한계가 있다.³ 이와 같이 파라미터가 미지인 시스템 또는 시시각각 변하는 시스템에 대해서도 페루프계의 특성이 항상 설계사양에 일치하도록 제어하는 것이 요구되는 경우에 제어시스템 파라미터의 변동에 대응하여 자동적으로 제어기 파라미터를 조정하고, 항상 희망하는 출력을 얻을 수 있는 제어방법이 적응제어이다.⁴ 최근 전기유압 서보계의 분야에도 적응제어이론이 활발히 적용되고 있다.⁵

적응제어이론 중 모델규범형 적응제어(Model reference adaptive control : MRAC)가 일반적이며, MRAC를 실제 시스템에 적용하는 경우에는 마이크로 컴퓨터를 이용하여 이산시간계에 대하여 실시한다. 山橋浩三 등⁴과 김 등⁵은 MRAC를 전기유압 서보계에 적용하여 연속시간 시스템이 안정한 영점을 포함하는 시스템(이하 최소위상계)일지라도 샘플링 주기와 제어시스템의 동특성에 의해 이산시간계에서는 불안정한 영점을 포함하는 시스템(이하 비최소위상계)으로 되어 제어 불가능함을 보고하였다.

따라서 본 논문에서는 비최소위상문제를 해결하기 위해 일반화최소분산 적응제어이론(Generalized minimum variance adaptive control : GMVAC)⁶를 전기유압 서보계의 위치제어에 적용하고, 샘플링 시간과 공급압력이 다른 경우에 대한 시뮬레이션 및 실험을 수행하여 그 유효성을 확인한다. GMVAC에서는 규범모델에의 추종성이 양호하지 않아 출력오차피드백을 GMVAC에 조합한 방법을 제안하여 제어시스템의 규범모델 추종성과 초기응답에서의 진동적 현상을 개선한다.

2. 이론해석

전기유압 서보계에 대한 제어기 설계를 행하기 위해 전기유압 서보계의 파라미터를 알고 있는 것으로 취급하여 GMVAC 및 출력오차피드백에 관한 제어기를 설계한 후 전기유압 서보계의 파라미터를 미지로 하여 제어기를 설계한다.

2.1 GMVAC의 개요

GMVAC는 비최소위상계에 적응제어를 적용하는 경우 나타나는 문제점을 해결하는 한 방법이다. 이 방법은 제어대상 시스템이 비최소위상계인 경우에 제어시스템의 출력과 규범모델의 출력의 분산을 최소로 함과 동시에 제어입력의 발산을 방지하기 위해 후술하는 평가함수를 도입한 것이 MRAC와 구별된다.

2.2 제어시스템

전기유압서보계의 개략도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 서보밸브를 비례요소로 하고 서보밸브의 부하유량식을 선형근사화하며 기름의 압축성의 영향과 유압 실린더에서의 누설을 무시하면 전기유압 서보계의 전달함수를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.⁵

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{k}{s(s + \alpha_1)} \quad (1)$$

여기서, α_1 은 시스템 파라미터, k 는 시스템 계인, $y(s)$ 는 유압실린더의 변위(이하 제어시스템의 출력), $u(s)$ 는 서보밸브에 인가한 제어입력신호이다.

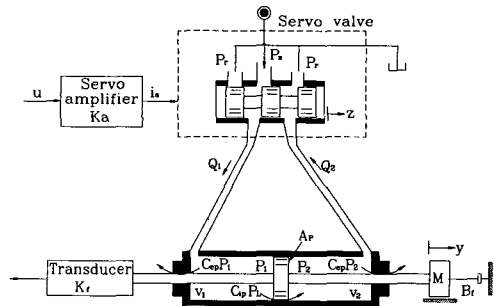


Fig. 1 Schematic diagram of electro-hydraulic servo system

2.3 일반화최소분산 적응제어(GMVAC)

본 논문의 GMVAC는 피드백 및 피드포워드 보상을 시스템 전달함수의 분모, 분자 다항식에 기초하여 설계하는 다항식대수법에 의한 설계방법으로 먼저 제어시스템의 동특성을 알고 있는 것으로 가정하여 페루프 전달함수가 규범모델의 전달함수에 일치하도록 모델매칭(Exact Model Matching)을 실현하는 제어기의 구조를 결정하고, 제어입력을 도출한다.

모델매칭의 블록선도는 Fig. 2와 같으며 제어기와 제어시스템으로 구성된다.

식 (1)의 z-변환 펄스전달함수는 식 (2)와 같다.

$$G(z) = \frac{b(z)}{A(z)} \quad (2)$$

여기서, $b(z)$ 는 1차 다항식, $A(z)$ 는 2차 모닉다항식이다.

규범모델의 펄스전달함수는 식 (3)과 같다.

$$G_d(z) = \frac{b_m(z)}{A_m(z)} \quad (3)$$

여기서, $b_m(z)$ 는 1차 다항식, $A_m(z)$ 는 2차 모닉다항식이다.

$d(z)$ 를 1차 임의 안정모닉다항식으로 하면, 전치보상기의 전달함수는 다음 식과 같다.

$$G_c(z) = d(z)G_d(z) \quad (4)$$

Fig. 2로부터 전폐루프계의 전달함수는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

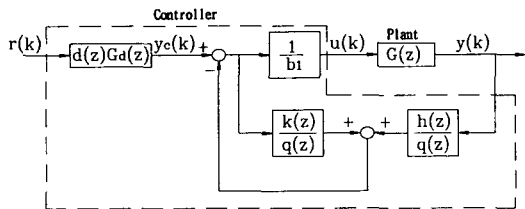


Fig. 2 Block diagram of exact model matching

$$\frac{y(k)}{r(k)} = \frac{b(z)q(z)d(z)G_d(z)}{[b_1q(z)A(z) + k(z)A(z) + h(z)b(z)]} \quad (5)$$

전폐루프계의 전달함수 식 (5)를 규범모델의 전달함수 식 (3)에 일치되도록 하면 다음의 Diophantine방정식⁷이 얻어진다.

$$k(z)A(z) + h(z)b(z) = q(z)[-b_1A(z) + d(z)b(z)] \quad (6)$$

식 (6)에서 임의 안정모닉다항식 $d(z) = z$, $q(z) = z + q_0$ 로 선정하고 다항식의 차수를 고려하면 $k(z)$, $h(z)$ 는 다음 식과 같이 유일하게 결정되고, 모델매칭이 실현되어진다.

$$k(z) = k_0, \quad h(z) = h_1z + h_0 \quad (7)$$

Fig. 2로부터 제어입력 $u(k)$ 는 식 (8)과 같다.

$$u(k) = \frac{1}{b_1}[-\frac{k(z)}{q(z)}u(k) - \frac{h(z)}{q(z)}y(k) + y_c(k)] \quad (8)$$

여기서, $y_c(k) (= d(z)G_d(z)r(k))$ 는 전치보상기의 출력이다.

식 (2)를 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} y(k) &= \frac{b_1}{z+d_0}u(k) + \frac{k_0}{(z+d_0)(z+q_0)}u(k) \\ &\quad + \frac{h_1z+h_0}{(z+d_0)(z+q_0)}y(k) \\ &= \Theta^T \Omega(k) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

$$\Theta = [b_1 \quad \theta]^T = [b_1 \quad k_0 \quad h_1 \quad h_0]^T$$

$$\Omega(k) = \left[\frac{1}{d(z)}u(k) \quad \frac{1}{d(z)}\omega(k) \right]^T$$

$$\omega(k) = \left[\frac{1}{q(z)}u(k) \quad \frac{z}{q(z)}y(k) \quad \frac{1}{q(z)}y(k) \right]^T \text{ 이다.}$$

GMVAC는 제어시스템 출력과 규범모델 출력의 분산을 최소로 함과 동시에 제어입력의 발산을 방지하기 위해 평가함수를 도입한 설계법이며, 평가함수⁶ J 는 식 (10)과 같이 둔다.

$$J = [\{ y_m(k+p) - y(k+p) \}^2 + \lambda u^2(k)] \quad (10)$$

여기서, p 는 제어시스템의 상대차수 차를 나타낸다.

식 (10)의 평가함수를 최소화하는 제어입력은 $\partial y(k+p)/\partial u(k) = b_1$, $\partial J/\partial u(k) = 0$ 을 사용하여 구하면 식 (11)과 같다.

$$u(k) = \frac{b_1}{b_1^2 + \lambda} \left\{ -\frac{k_0}{z + q_0} u(k) - \frac{h_1 z + h_0}{z + q_0} y(k) + y_c(k) \right\} \quad (11)$$

2.4 적응제어계

전 절에서 결정한 제어기의 구조 및 제어입력을 기초로 하여 제어시스템의 동특성이 미지인 경우에 대해 GMVAC 시스템을 구성하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. GMVAC는 규범모델, 제어시스템, 제어기, 적응기구로 구성된다.^{3,8}

식 (9)에 기초하여 제어시스템의 출력 $y(k)$ 의 추정치 $\hat{y}(k)$ 는 식 (12)와 같이 정의한다.

$$\hat{y}(k) = \Theta^T(k-1) \Omega(k) \quad (12)$$

여기서,

$$\Theta(k) = [b_1(k) \quad \bar{n}_0(k) \quad \bar{n}_1(k) \quad \bar{n}_0(k)]^T$$

동정오차 $\epsilon(k)$ 는 식 (13)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \epsilon(k) &= \hat{y}(k) - y(k) \\ &= [\Theta^T(k-1) - \Theta^T] \Omega(k) \end{aligned} \quad (13)$$

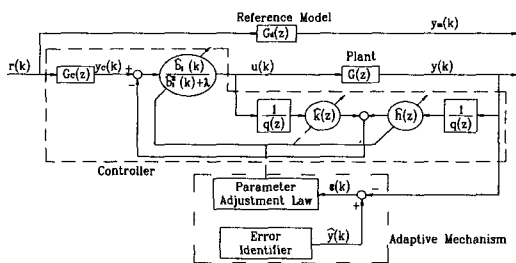


Fig. 3 Block diagram of GMVAC

미지 파라미터를 조정하기 위한 파라미터 조정칙은 $k \rightarrow \infty$ 때 동정오차 $\epsilon(k)$ 가 0이 되도록 즉, $\bar{b}_1 \rightarrow b_1$, $\Theta^T(k) \rightarrow \theta^T$ 이 되도록 식 (14)~식 (16)의 최소자승법 알고리즘을 사용한다.

$$\Theta(k) = \Theta(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\Omega(k)\epsilon(k)}{1 + \Omega^T(k)\Gamma(k-1)\Omega(k)} \quad (14)$$

$$\Gamma(k) = \Gamma(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\Omega(k)\Omega^T(k)\Gamma(k-1)}{1 + \Omega^T(k)\Gamma(k-1)\Omega(k)} \quad (15)$$

$$\Gamma(-1) = \gamma I \quad (16)$$

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

GMVAC에서의 제어입력은 식 (11)과 식 (12)로부터 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(k) = \frac{\bar{b}_1(k)}{\bar{b}_1^2(k) + \lambda} \{ \Theta^T(k)\omega(k) + y_c(k) \} \quad (17)$$

여기서, 미지 파라미터 $\Theta(k)$ 는 다음과 같다.

$$\Theta(k) = [\bar{n}_0(k) \quad \bar{n}_1(k) \quad \bar{n}_0(k)]^T$$

2.5 GMVAC와 출력오차 피드백의 조합

Fig. 4는 Fig. 3의 GMVAC에 출력오차 피드백을 조합한 경우의 블록선도이다.

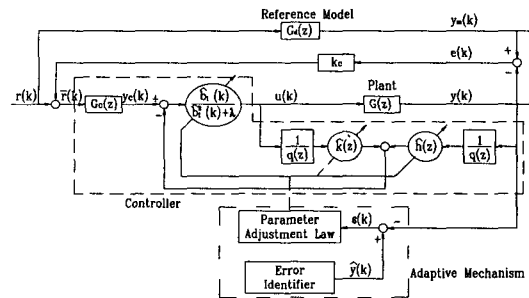


Fig. 4 Block diagram of GMVAC combined output error feedback

Fig. 4에서 $e(k)$ 는 출력오차, k_c 는 피드백 계수이다.

GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 시스템의 제어입력 $u(k)$ 는 식 (18)과 같다.

$$u(k) = \frac{b_1(k)}{b_1^2(k) + \lambda} \{ \theta^T(k) \omega(k) + G_c(z) \bar{r}(k) \} \quad (18)$$

여기서, $\bar{r}(k) = r(k) + k_c \{ y_m(k) - y(k) \}$ 이다.

3. 실험장치 및 실험방법

본 논문에 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. 실험장치의 주요부분은 유압원, 제어밸브, 액추에이터, 제어기의 4부분으로 구성된다. 실험에 사용한 서보밸브, 유압실린더, 위치센서 및 AD/DA변환기의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of the experimental apparatus

Instruments	Specification
Servo valve	Tokyo Precision Ins.34-30L-30-14
Cylinder	Samick SK110-DB
Potentiometer	MOOG A04955
AD&DA Converter	AXION Techno. Co. AX5622B

알고리즘 연산에는 Pentium-100MHz의 Micro-processor를 사용하였으며, BorlandC++3.1을 사용하여 프로그램을 작성하였다.

규범모델은 식 (19)와 같이 설계하였다.

$$G_d(s) = \frac{y_m(s)}{r(s)} = \frac{\omega_n}{s^2 + 2\omega_n s + \omega_n} \quad (19)$$

식 (19)에서 규범모델은 상승시간 0.72초, 퍼센트 오버슈트 0이 되도록 결정하였다.

실험을 행하는 경우 제어시스템 파라미터는 미지이므로 $\theta(0) = [10 \ 0 \ 0]$, $\Gamma(0) = 1000I$ 로 하였으며, λ 는 시행착오에 의해 0.007로 결정하였다. 제어시스템 출력과 제어입력은 다음과 같이 무차원화 하였다.

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

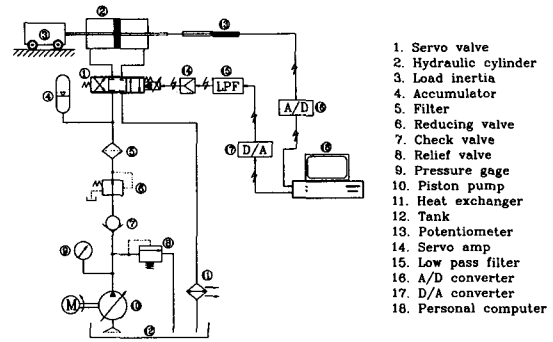
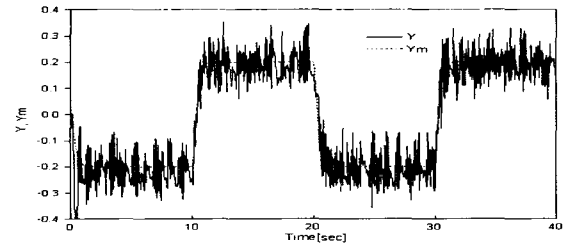


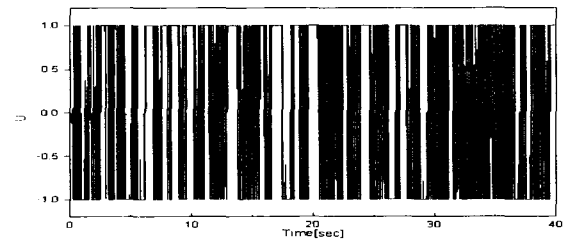
Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus

4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 전기유압 서보시스템에 MRAC를 적용한 결과이다. 이때 공급압력은 6.86MPa, 관성부하는 60kg, 샘플링 시간은 10ms이다. Fig. 6 (a)에서 제어시스템 출력 (y)은 채터링이 발생하여 규범모델 출력 (y_m)을 추종하지 못하며, Fig. 6 (b)에서 제어입력 (u)은 ± 1 에서 진동함을 알 수 있다. 이는 샘플링 시간 10ms에서 제어시스템이 비최소위상계로 되기 때문인 것으로 생각한다.



(a) Output of reference model and plant



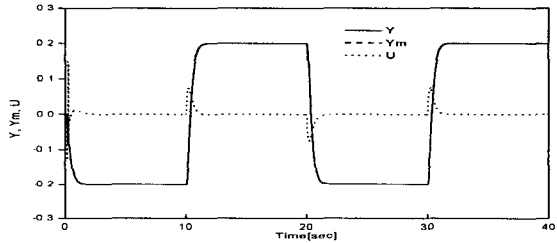
(b) Control input

Fig. 6 Experimental result of MRAC

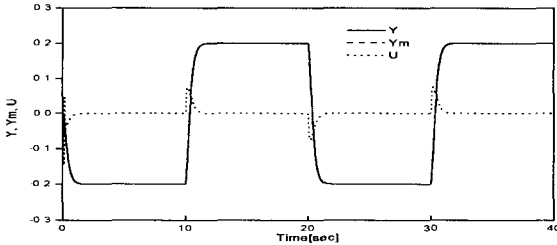
Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건에서 샘플링 시간 만을 10ms, 5ms, 1ms로 변화시켜 GMVAC를 적용한 시뮬레이션결과이다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 제어시스템 출력은 (a)에서는 0.3초, (b)에서는 0.21초, (c)에서는 0.1초 이후부터 규범모델에 일치되고 있다.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 조건에서 행한 실험결과이며, 제어시스템 출력은 (a)에서는 0.72초, (b)에서는 0.48초, (c)에서는 0.29초 이후부터 규범모델 출력에 일치함을 알 수 있다.

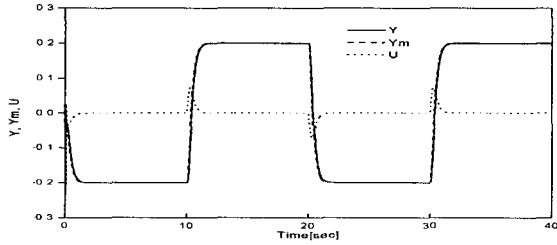
이것으로부터 GMVAC는 MRAC에서 제어 불가능으로 되는 경우에 이를 해결할 수 있는 제어기법이며, 샘플링 시간이 짧아짐에 따라 제어시스템의 규범모델 추종성도 향상됨을 알 수 있다.



(a) Sampling time : 10ms

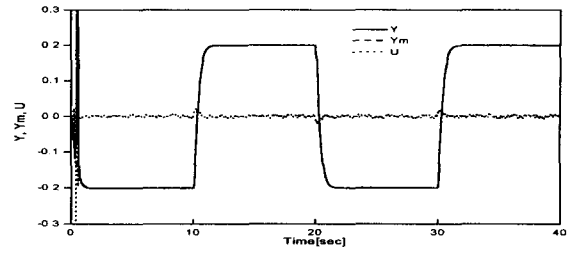


(b) Sampling time : 5ms

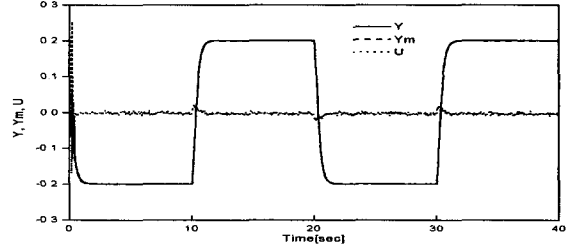


(c) Sampling time : 1ms

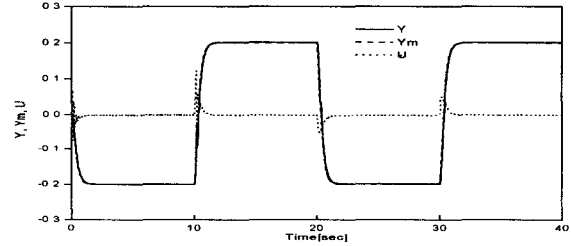
Fig.7 Simulation result of GMVAC



(a) Sampling time : 10ms



(b) Sampling time : 5ms



(c) Sampling time : 1ms

Fig. 8 Experimental result of GMVAC

Fig. 9는 Fig. 8의 (a)와 동일한 조건에서 GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 제어기법을 행한 실험결과이며, 이때 피드백 게인 k_c 는 0.15로 하였다. Fig. 9에서 제어시스템 출력은 오버슈트를 발생하지 않으며, 응답초기부터 규범모델에 일치하고 있다. 따라서 Fig. 8 (a)의 결과에 비해 제어 성능이 향상되었음을 알 수 있다.

Fig. 10은 유압실린더의 공급압력(P_s)을 각각 3.92 MPa, 6.86 MPa, 9.8 MPa로 하여 행한 시뮬레이션결과이며, Fig. 11은 실험결과이다. 이 경우 관성부하는 60 kg, 샘플링 시간은 10ms로 하였다. Fig. 10으로부터 제어시스템 출력은 (a)의 경우 0.28초, (b)의 경우 0.3초, (c)의 경우 0.3초 이후부터 규범모델 출력에 일치함을 보이고 있다. 따라서 공급압력이 증가하여도 GMVAC의 경우 제어시스템의 규범모델 추종성능은 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

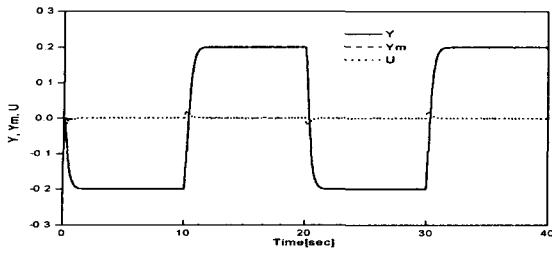
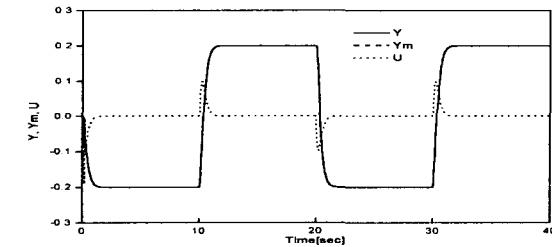
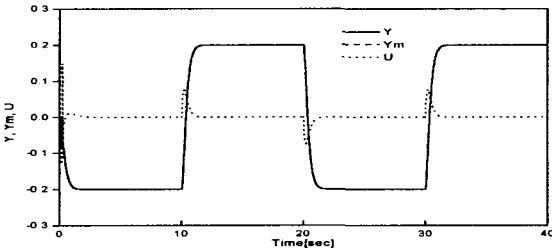


Fig. 9 Experimental result of GMVAC combined output error feedback

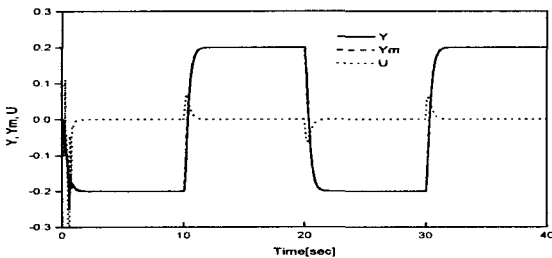
다. 초기응답에서 Fig. 10 (a)의 제어입력의 변동에 비해 (b), (c)에서 제어입력의 변동이 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 공급압력의 증가로 인해 서보밸브의 압력-유량 특성이 변화되기 때문인 것으로 생각된다.



(a) $P_s = 3.92 \text{ MPa}$



(b) $P_s = 6.86 \text{ MPa}$



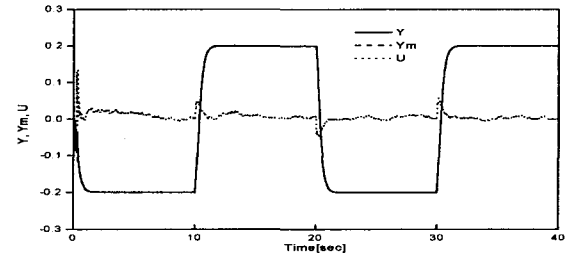
(c) $P_s = 9.8 \text{ MPa}$

Fig. 10 Simulation result concerning different supply pressures

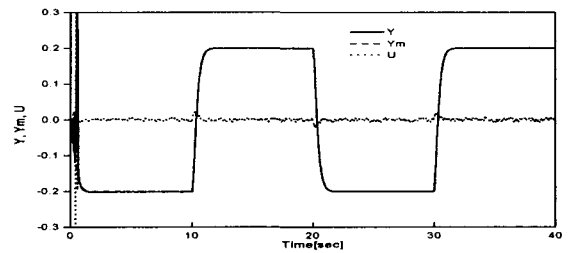
Fig. 11 (a)-(c)의 실험결과에서도 시뮬레이션 결과와 같이 공급압력이 증가할수록 제어시스템의 초기응답에서 제어성능이 저하됨을 알 수 있다. 제어시스템이 규범모델을 추종한 후 제어입력의 미세한 진동은 부하압력 변동과 유압장치의 비선형성에 기인한 것으로 생각된다.

이상의 결과로부터 공급압력은 시스템의 특성을 변화시키는 주요 인자임을 알 수 있다. GMVAC의 경우 공급압력이 큰 경우보다 작은 경우에 초기응답에서 진동이 작고, 오버슈트가 없는 양호한 제어성능을 얻을 수 있으며 제어시스템의 규범모델 추종성이 우수함을 확인할 수 있다.

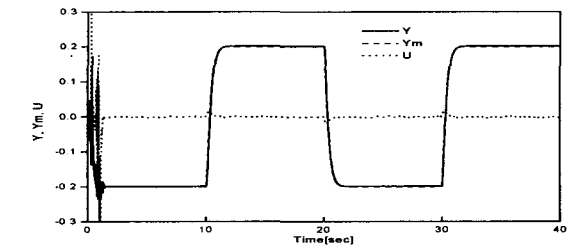
Fig. 12는 Fig. 11과 동일한 조건에서 GMVAC와



(a) $P_s = 3.92 \text{ MPa}$



(b) $P_s = 6.86 \text{ MPa}$



(c) $P_s = 9.8 \text{ MPa}$

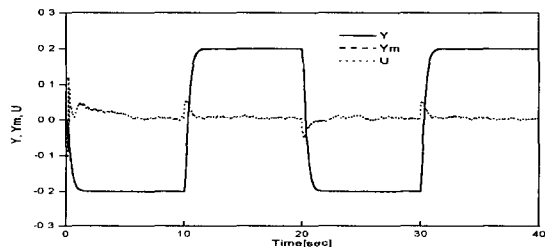
Fig. 11 Experimental result concerning different supply pressures

5. 결론

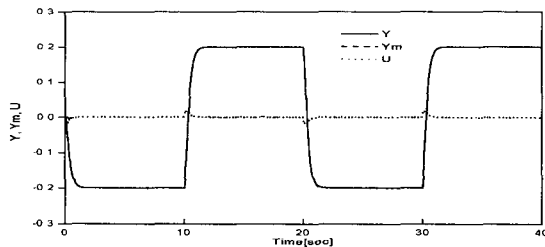
출력오차 피드백을 조합한 제어방법을 적용한 실험결과이며, 이때 피드백 게인 k_c 는 0.15로 하였다.

Fig. 12에서 제어시스템 출력은 오버슈트를 발생하지 않으며, 초기응답부터 규범모델에 일치하여 Fig. 11의 결과에 비해 제어성능이 크게 향상되었음을 알 수 있다.

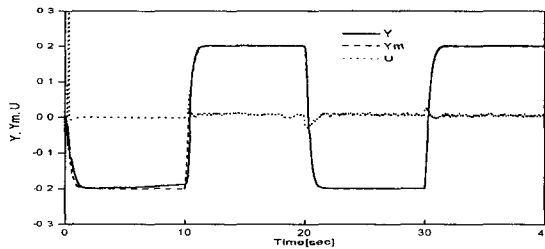
따라서 본 논문에서 제안한 GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 방식이 제어시스템의 규범모델 추종성을 향상시킴과 동시에 제어시스템의 파라미터가 변동하여도 제어성능을 일정하게 유지할 수 있는 제어기법임을 확인할 수 있다.



(a) $P_s = 3.92 \text{ MPa}$



(b) $P_s = 6.86 \text{ MPa}$



(c) $P_s = 9.8 \text{ MPa}$

Fig. 12 Experimental result of GMVAC combined output error

본 논문에서는 GMVAC를 설계하여 전기유압 서보계의 위치제어를 행하여 샘플링 주기와 공급압력을 달리하여 시스템 파라미터 변동에 따른 제어성능을 검토하였다. 또한 초기응답특성을 개선하기 위해 GMVAC와 출력오차 피드백을 결합한 제어방식을 제안하여 그 제어성능을 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 논문에서 대상으로 한 전기유압 서보계는 MRAC를 적용한 경우 샘플링 주기 10ms이하에서는 제어가 불가능하였지만 이를 GMVAC를 적용하여 해결하였으며, GMVAC의 경우 샘플링 주기를 짧게 할수록 제어성능이 개선됨을 확인할 수 있었다.

2. 공급압력이 높을수록 초기 출력진동의 증가로 인하여 GMVAC의 제어성능이 다소 저하하였지만, 제어시스템의 출력은 2주기부터 규범모델의 출력에 잘 일치하였다.

3. GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 제어방식을 이용한 경우에 초기응답 특성이 개선되었으며, 제어시스템의 규범모델 추종성도 향상시킬 수 있었다.

4. GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 제어방식은 공급압력이 다른 경우(시스템 파라미터 변동)에도 제어성능을 일정하게 유지할 수 있는 강한 적응제어방식임을 확인하였다.

후기

본 논문은 2000학년도 경남대학교 연구년 교수연구비의 지원으로 이루어 졌음을 밝힙니다.

참고문헌

1. Hanabusa, "Recent Trends and Expansion of the Hydraulic Servo Technique," J. of the Study on Mech., Vol. 33, No. 1, pp. 7-14, 1981.
2. Hanabusa, Ida, "Management of Non-Linearity Characteristic in the Servo System," J. of the Measurement & Control, 1978.
3. Kanai Y., "Robust Adaptive Control," Ohm

- Publisher, 1990.
4. Yamahashi K., Ikee S., Takahashi K., "Application of Explicit Model Reference Adaptive Control Theory to an Electrohydraulic Servo-system," J. of the Hydraulic & Pneumatic, Vol. 20, No. 7, pp. 71-78, 1987.
 5. Kim, K. H., Yoon, I. R., Park, J. B., Kim, J. K., Yum, M. O., "A Study on the Electro Hydraulic Servo System by Using Model Reference Adaptive Control," J., of the KSPE, Vol.14, No.5, pp. 92-99, 1997.
 6. Clarke D. W., "Self-Tuning Control of Non-Minimum Phase System," Automatica, Vol. 20, No. 5, pp. 501-517, 1984.
 7. Ichigawa K., "Control System Design Method[III]," J. of the Measurement & Control, Vol. 23, No. 8, pp. 701-705, 1984.
 8. Narendra K. S. and Monopoli R. V., "Application of Adaptive Control," Academic Press, 1980.