

일반화최소분산 적응제어를 이용한 유압 서보계의 특성개선에 관한 연구

박용호[†] · 김기홍* · 이진걸**

(원고접수일 : 2003년 2월 17일, 심사완료일 : 2003년 3월 6일)

Characteristics Improvement of Hydraulic Servosystem by Using Generalized Minimum Variance Adaptive Control

Young-Ho Park[†] · Ki-Hong Kim* · Jin-Kul Lee**

Key words : Generalized minimum variance adaptive control(GMVAC, 일반화최소분산적응 제어), Model reference adaptive control(모델규범형 적응제어), Nonminimal phasesystem (비최소위상시스템), Reference model(규범모델)

Abstract

Hydraulic system is difficult to obtain a suitable performance due to the non-linearity, load pressure change and system parameter variation. The requirement of control algorithm has been complex in order to satisfy the performance. The adaptive control is a control method which is suggested to achieve the control object under the plant characteristics change. In spite of the case that plant characteristics and the degree of variation are difficult to grasp, the adaptive control could keep the characteristics of closed-loop system generally.

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

1. 서 론

유압 서보계는 다른 동력전달장치에 비해 응답

성이 우수하며, 단위 중량당 출력비가 높고 외력에 대한 강성이 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 유압 서보계는 고속, 고정밀도를 요구하는 NC공작

[†] 책임저자(부산대학교 대학원 지능기계공학과), E-mail:yhpark@mail.koje.ac.kr, T:(055)680-1600

* 구미1대학 기계설계과(khkim@kumi.ac.kr)

** 부산대학교 기계공학부(leejik@pusan.ac.kr)

기계, 재료 및 진동시험기, 비행 시뮬레이터, 로봇 등의 구동에 응용되고 있다. 그러나 작동압력, 작동유온, 부하 등의 작업환경이 변화하는 경우에는 고정도의 제어성능을 유지하기 어렵다. 이러한 문제점을 PID, 상태변수 피드백, 극배치, 모델매칭 등의 제어방식으로 해결하는 데는 한계가 있으므로 플랜트의 파라미터가 변동하는 경우 제어기의 파라미터를 자동적으로 조정하여 항상 일정한 제어성능을 유지할 수 있는 적응제어방법으로 해결하려는 연구가 발표되고 있다^{(1),(2)}. Yamahashi는 이산시간 모델규범형 적응제어(MRAC)를 서보밸브로 구성된 유압 서보계에 적용할때 이산화에 의한 비최소위상 문제를 보고하였다^{(3),(4)}. 小山 등은 온-오프 구동 공기압 서보시스템에 MRAC와 비례제어를 행하여 플랜트의 파라미터 변동에 따른 제어결과를 비교 검토하였다⁽⁵⁾. 김 등은 MRAC를 이용하여 유압 서보계의 파라미터 변동에 따른 제어성능을 검토하였고, 또한 샘플링 시간과 관계된 비최소위상 문제를 보고하였다⁽⁶⁾. 적응제어방법을 이용하는 경우에 파라미터 조정칙 등으로 인해 연산량이 많기 때문에 이산시간 제어기를 구성한다. 연속시간계를 이산화하는 경우에는 샘플링 시간을 매우 짧게하면 이산시간계는 비최소위상계가 되어 제어가 불가능하다. 비최소위상 문제를 해결하기 위한 방법으로 여러가지 연구가 보고되는데 본 연구에서는 D.W Clarke이 제안한 일반화최소분산 적응제어(GMVAC) 이론을 유압 서보계에 적용하여 비최소위상 문제를 해결한다^{(8),(10)}. MRAC의 경우 관성부하의 변동은 제어성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고되고 있으므로^{(3),(6)} 공급압력의 변동에 따른 GMVAC의 제어성능을 고찰한다. 특히 적응제어에서 응답 초기에 발생하는 플랜트 출력의 진동을 해결하기 위해 GMVAC와 출력오차 피드백을 결합한 제어방식을 제안하여 제어성능을 개선한다.

2. 이론해석

2.1 GMVAC

유압 서보계는 서보밸브, 대칭 실린더로 구성되

며, 부하는 관성부하만으로 한다. 서보밸브의 부하 유량식을 선형근사화하고, 기름의 압축성에 의한 영향을 무시하며, 서보밸브를 비례요소로 하면 연속시간에서 유압 서보계의 동특성은 (1)과 같이 2차계로 근사화 되어진다.

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

여기서, α_1 은 플랜트 파라미터이며, k 는 플랜트 이득이다. 그리고 $y(s)$ 는 유압실린더의 변위(플랜트의 출력)이며, $u(s)$ 는 서보밸브에 인가하는 전압이다. (1)을 z-변환한 이산시간계는 (2)와 같다.

$$y(k) = \frac{b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} u(k) \quad (2)$$

여기서, a_1, a_2, b_0, b_1 은 플랜트 파라미터이다.

플랜트의 비최소실현은 (3)과 같다.

$$y(k) = b_2 \frac{1}{d(z)} u(k) + \frac{k(z)}{d(z)q(z)} u(k) + \frac{h(z)}{d(z)q(z)} y(k) \quad (3)$$

임의의 $d(z) = z + d_0, q(z) = z + q_0$ 로 선정하면 Diophantine방정식⁽⁷⁾으로부터 구한 $k(z), h(z)$ 는 $k(z) = k_0, h(z) = h_1 z + h_0$ 로 나타낼 수 있다.

규범모델의 출력과 플랜트의 출력을 최소화하고 제어입력을 최소화하기 위한 평가함수 J 를 (4)와 같이 도입한다⁽⁸⁾.

$$J = [\{ y_m(k+d) - y(k+d) \}^2 + \lambda u^2(k)] \quad (4)$$

여기서, d 는 플랜트의 상대차수 차를 나타낸다. (4)의 평가함수를 최소화하는 제어칙은 $\partial y(k+d)/\partial u(k) = b_2, \partial J/\partial u(k) = 0$ 을 사용하여 구하면 (5)와 같다.

$$u(k) = \frac{b_2}{b_2 + \lambda} \left\{ -\frac{k_0}{z + q_0} u(k) - \frac{h_1 z + h_0}{z + q_0} y(k) + y_c(k) \right\} \quad (5)$$

여기서, $y_c(k)$ 는 전치보상기의 출력이다.

2.2 GMVAC와 출력오차 피드백의 조합

Fig. 1은 GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 블록선도이다.

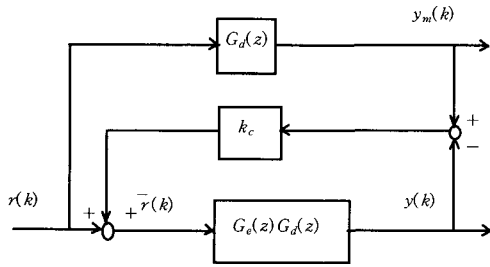


Fig. 1 Block Diagram of GMVAC and Output Error Feedback.

Fig. 1에서 기준입력 $r(k)$ 에서 $\bar{r}(k)$ 까지는 (6)과 같다.

$$\bar{r}(k) = r(k) + k_c \{ y_m(k) - y(k) \} \quad (6)$$

여기서, k_c 는 출력오차 피드백이득이다.

2.3 적응제어시스템

(3)으로부터 동정기 출력은 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{y}(k) = \hat{\Theta}(k-1) \Omega(k) \quad (7)$$

여기서,

$$\hat{\Theta}(k) = [\hat{d}_2(k) \quad \hat{\vartheta}^T(k)]^T,$$

$$\hat{\vartheta}(k) = [\hat{k}_0(k) \quad \hat{h}_1(k) \quad \hat{h}_0(k)]$$

$$\Omega(z) = \left[\frac{1}{z + d_0} u(z) \quad \frac{1}{z + d_0} \omega(z) \right]^T$$

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

동정오차 $\varepsilon(k)$ 를 (8)과 같이 정의하고 파라미터 조정칙^[10]은 (9), (10)을 사용한다.

$$\varepsilon(k) = \hat{y}(k) - y(k) \quad (8)$$

$$\hat{\vartheta}(k) = \hat{\vartheta}(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\Omega(k)\varepsilon_1(k)}{1 + \Omega^T(k)\Gamma(k-1)\Omega(k)} \quad (9)$$

$$\Gamma(k) = \Gamma(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\Omega(k)\Omega^T(k)\Gamma(k-1)}{1 + \Omega^T(k)\Gamma(k-1)\Omega(k)} \quad (10)$$

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

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

GMVAC에서의 제어칙은 (11)과 같다.

$$u(k) = -\frac{\hat{d}_1(k)}{\hat{d}_1^2(k) + \lambda} \{ \hat{\vartheta}^T(k)\omega(k) + y_c(k) \} \quad (11)$$

GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 시스템의 제어칙은 (12)와 같다.

$$\bar{r}(k) = r(k) + k_c \{ y_m(k) - y(k) \}$$

$$u(k) = -\frac{\hat{d}_1(k)}{\hat{d}_1^2(k) + \lambda} \{ \hat{\vartheta}^T(k)\omega(k) + d(z)G_d(z)\bar{r}(k) \} \quad (12)$$

GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 제어방식의 블록선도는 Fig. 2에 나타내었다.

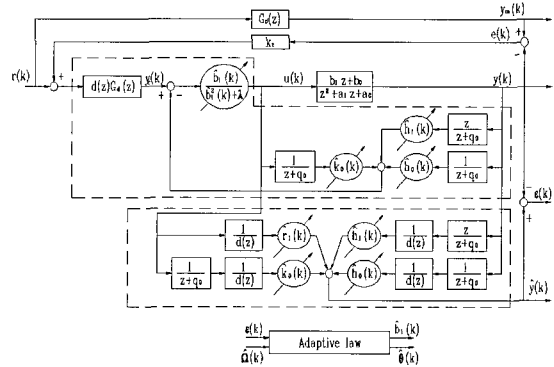


Fig. 2 Block Diagram of GMVAC and Output Error Feedback.

3. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 제안한 이산시간 적응제어기의 유효성을 검증하기 위하여 실제 제작한 실험장치의 구성은 Fig. 3과 같고 실험에 사용한 기기의 사양은 Table 1과 같다. 컴퓨터에는 C-언어로 프로그램된 이산시간 규범모델 제어기와 기준입력을 내장하여 디지털제어기로 이용하였다. DA&C 카드는 AX-5622B로서 성능은 A/D변환인 경우 변환시간 10μsec이하, 분해능이 16bit이고 D/A변환인 경우에는 분해능이 12bit이다. 사용된 포텐쇼미터는 A04955로서 행정이 125mm, 선형성이 ±0.3%이며, 분해능은 무한대이다. 본 연구에서 적용한 규범모델은 (13)과 같다.

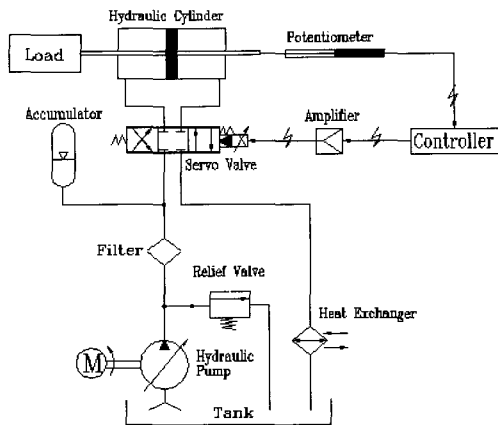


Fig. 3 Schematic diagram of experimental.

$$G_d(s) = \frac{y_m(s)}{r(s)} = \frac{\omega_n}{s^2 + 2\omega_n s + \omega_n} \quad (13)$$

(13)에서 규범모델은 상승시간 0.72초, 퍼센트 오버슈트 0이 되도록 결정하였고 본 연구에서 사용한 규범모델의 출력은 Fig. 4에 나타내었다. 실험에 사용한 제어기 파라미터의 초기치는 $\hat{\theta}(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$, $\Gamma(0) = 1000I$, $\lambda = 0.007$ 로 하였다.

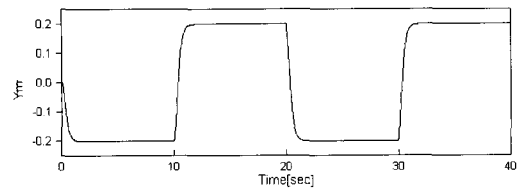


Fig. 4 Output of reference model apparatus.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 유압 서보시스템에 MRAC를 적용한 결과이며 y_m 및 y 는 각각 규범모델과 플랜트의 출력이다. 이때 공급압력은 6.86MPa, 관성부하는 60kg, 샘플링 주기는 10ms이다. Fig. 5에서 플랜트는 진동하며 규범모델을 추종하지 못하고 있다. 이는 샘플링 주기 10ms에서 플랜트가 비최소위상계로 되기 때문이다^[9].

Table 1 Dimensions of the hydraulic servosystem.

Parameters		Value	Parameters		Value
Servovalve	K_t	$8.33 \times 10^{-4} \text{ cm/mA}$	Servo Amp.	K_a	10 mA/V
	ω_n	$24 \times 2\pi \text{ rad/s}$	Potentiometer	K_f	2 V/cm
	ζ	0.9	Cylinder	A_p	5.25 cm^2
	k_1	$1.4 \times 10^4 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} / \text{cm}$		V_t	114 cm^3
	k_2	$0.5 \text{ cm}^5 / \text{kg}_f \text{ s}$	Hydraulic oil	β_e	$7800 \text{ kg}_f / \text{cm}^2$
	C_d	0.6		ρ	$8.67 \times 10^{-7} \text{ kg}_f \text{ s}^2 / \text{cm}^4$

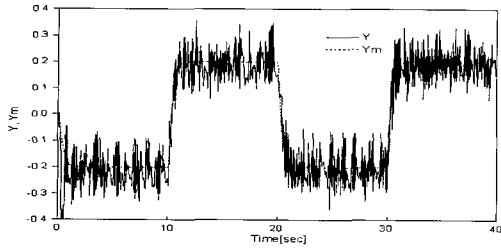
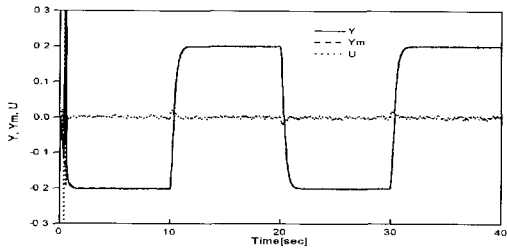
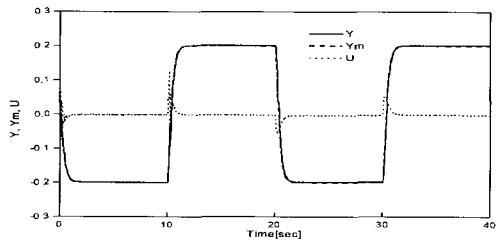


Fig. 5 Experimental Results of MRAC.



(a) In case of sampling time 10ms



(b) In case of sampling time=1ms

Fig. 6 Experimental results of GMVAC.

Fig. 6은 Fig. 5에서 발생한 비최소위상 문제를 해결하기 위해 GMVAC를 적용한 실험 결과인데 $\lambda=0.007$ 로 하였다. Fig. 6 (a)에서 플랜트 출력은 약 0.54초에서 117%의 큰 오버슈트를 발생하지만 0.72초부터 규범모델 출력에 일치하는 제어성능을 나타내고 있다. 이 경우의 오버슈트는 목표치를 기준으로 하여 계산한 량이다. Fig. 6 (b)에서 플랜트 출력과 규범모델 출력의 차 즉, 출력오차는 응답초기에 미소하게 발생하지만 0.29 초 이후부터 발생하지 않는다. 따라서 GMVAC는 MRAC에서 발생하는 비최소위상을 해결할 수 있는 제어 기법임을 확인할 수 있다. 또한 샘플링 주기가 짧아짐에 따라 오버슈트가 감소하며, 플랜트

의 규범모델 추종성도 향상됨을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6 (a)와 동일한 조건에서 GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 제어기법을 유압 서보계에 적용하여 실험을 행한 결과이며, 이때 피드백 이득 k_c 는 0.15로 하였다. Fig. 7에서 플랜트 출력은 오버슈트를 발생하지 않으며, 응답초기부터 규범모델에 일치하고 있다. 따라서 Fig. 6 (a)의 결과에 비해 제어성능이 향상되었음을 알 수 있다. Fig. 8은 GMVAC와 출력오차 피드백의 조합과 GMVAC의 초기응답에서 출력오차를 비교한 결과이다. 그림에서 좌측의 종축은 GMVAC와 출력오차를 조합한 경우이며 실선으로, 우측의 종축은 GMVAC를 이용한 경우이며 점선으로 나타내었다.

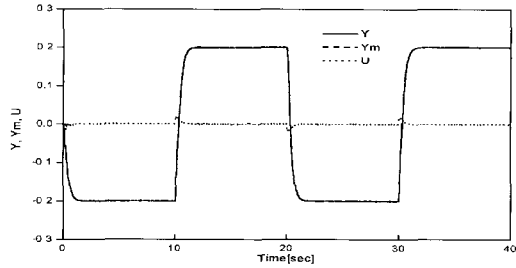


Fig. 7 Experimental results of GMVAC.

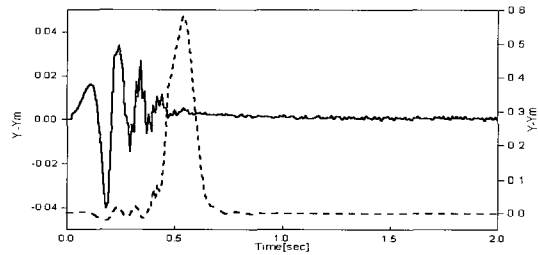


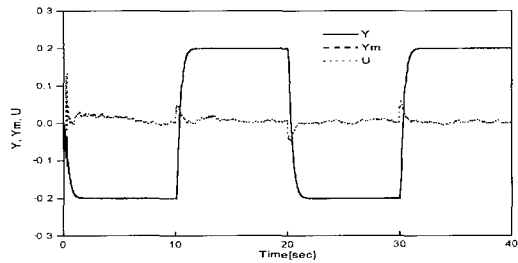
Fig. 8 Comparison of output error and output feedback.

본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 유압 서보계를 제어한 경우 초기응답에서 최대 출력오차는 0.04이며, 플랜트 출력은 미소한 진동을 보이고 있다. 그리고 약 0.5초가 경과한 후 출력오차는 0 즉, 플랜트 출력은 규범모델 출력에 일치된다. GMVAC만을 적용한 경우 약 0.5초에서 최대 출

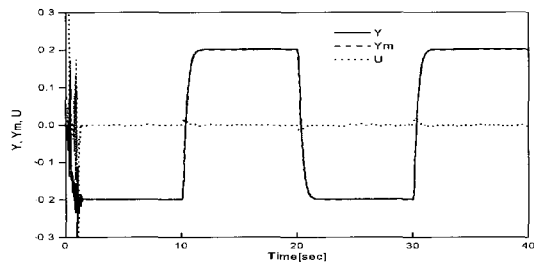
력오차는 0.58이며, 0.73초에서 플랜트 출력은 규범모델 출력에 일치됨을 보이고 있다. 따라서 GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 방식이 초기응답에서 발생하는 진동과 오버슈트를 감소시키고 동시에 플랜트의 규범모델 추종성을 향상시킬 수 있는 유효한 제어 기법임을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 각각 공급압력 3.92MPa과 9.8MPa 일 때 GMVAC 제어방식을 유압서보계에 적용한 실험 결과이다. 이 경우 샘플링 주기10ms, 관성 부하 60Kg이다. Fig. 9 (a)에서는 플랜트의 초기응답에서 미소한 진동이 발생하지만 0.4초 이후 규범모델에 일치하고 있다. Fig. 9 (b)의 초기응답에서 플랜트는 진동과 오버슈트를 발생하지만, 1.4초부터 규범모델에 일치하는 결과를 보이고 있다. 이상의 결과로부터 공급압력은 시스템의 특성을 변화시키는 주요 인자임을 확인할 수 있었다. GMVAC의 경우 공급압력이 큰 경우보다 적은 경우에 초기응답에서 진동이 작고, 오버슈트가 없는 양호한 제어성능을 얻을 수 있으며 플랜트의 규범모델 추종성이 우수함을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 조건에서 GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 제어방식을 유압 서보계에 적용한 실험 결과이다. Fig. 10 (a)에서 플랜트 출력은 미소한 진동을 보인 후 0.3초부터 규범모델 출력에 일치하고 있다. 따라서 본 방식으로 제어를 행한 경우 GMVAC의 경우보다 플랜트는 규범모델에 0.1초 빠르게 일치함을 알 수 있다. 이 경우 최대 출력오차는 GMVAC의 경우에는 0.04인데 비해 GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 경우에는 0.005로 감소되었다. Fig. 10 (b)의 결과에서 플랜트 출력은 초기에 미소한 진동을 보이지만 0.4초부터 규범모델을 추종하여 1.7초에 일치하고 있다. 최대출력오차는 GMVAC의 경우에는 0.3인데 비해 GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 경우에는 0.04로 감소되었다. 따라서 시스템 파라미터가 변동하는 경우 및 초기응답에서 진동과 오버슈트가 발생하는 경우에는 본 연구에서 제안한 GMVAC와 출력오차 피드백을 조합한 제어방식이 유효함을 알 수 있다. 또한, 플랜트의 규범모델 추종성도 향상됨을 확인할 수 있다.

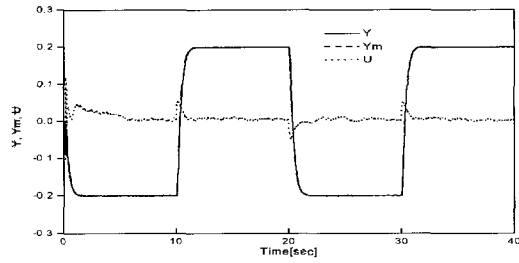


(a) In case of supply pressure 3.92MPa

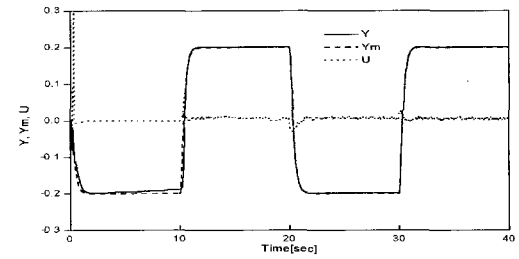


(b) In case of supply pressure 9.8MPa

Fig. 9 Experimental results of the GMVAC.



(a) In case of supply pressure 3.92MPa



(b) In case of supply pressure 9.8MPa

Fig. 10 Experimental results of the GMVAC combined with output error feedback ($T_s=10ms$).

5. 결 론

본 연구에서는 유압 서보계에 MRAC를 적용하는 경우에 플랜트가 비최소위상계로 되는 문제를 해결하기 위해 GMVAC를 이용하였다. 또한 초기 응답에서 진동을 줄이기 위해 출력오차 피드백을 응용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. MRAC에서 발생하는 비최소위상 문제는 GMVAC를 이용하여 해결할 수 있고, GMVAC의 유효성을 확인할 수 있었다.
2. GMVAC를 이용하여 유압 서보계를 제어하는 경우 제어성능은 공급압력 변동에 대해서도 양호하였다.
3. GMVAC를 적용한 경우에 발생하는 초기응답에서의 진동과 오버슈트는 출력오차 피드백을 조합한 제어방식으로 해결할 수 있었다.

참고문헌

- [1] 金井善美雄, ロバスト適應制御入門, オーム社, 1990.
- [2] 市川邦彦, 制御系の設計理論, 技術書院, 1989.
- [3] 山橋浩三, 高橋浩爾, 池尾 茂, “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,” 油壓と空壓, 第20卷, 第7号, pp. 71-78, 1987.
- [4] K. J. ASTROMZ at al, “Zeros of Sampled Systems”, Automatica, Vol. 20, No. 5, pp. 501-517, 1984.
- [5] 小山 紀, 津端佳介, 原田正一, “高速應答電磁弁によるオンオフ駆動空氣壓サーボシステムのモデル規範形適應制御”, 油壓と空壓, 第24卷, 第6号, pp. 110-116, 1994.
- [6] 김기홍, “모델기준형 적응제어를 이용한 전기 유압 서보계의 제어에 관한 연구,” 한구정밀 공학회, 제14권, 제5호, pp. 92-99, 1997.
- [7] 市川邦彦, “制御系の設計法(Ⅲ)”, 計測と制御, 第23卷, 第8号, pp. 701-705, 1984.

- [8] D. W. Clarke, “Self-Tuning Control of Non-Minimum Phase System”, Automatica, Vol. 20, No. 5, pp. 501-517, 1984.
- [9] 윤일로, “적응제어기를 이용한 전기유압 서보계의 제어특성 개선에 관한 연구”, 경남대학교 박사학위논문, 1999.
- [10] K. Yamahashi, K. Takahashi, S. Ikee, “Application of Model Reference Adaptive Control Theory to an Electrohydraulic Servo System: A Solution of the Non-Minimum Phase Problem”, Computers in Fluid Power, pp. 30-43, 1990.

저 자 소 개



박용호 (朴勇昊)

1959년 4월생. 1985년 경남대학교 기계공학과 졸업. 1988년 부산대학교 기계공학과 석사. 부산대학교 지능기계공학과 박사과정 1978년 - 1992년 LG 전자 설계실 근무. 1997년 - 현재 거제대학 기계과 조교수 재직중



김기홍 (金基弘)

1960년 12월생. 1986년 경남대학교 기계공학과 졸업. 1997년 경남대학교 대학원 졸업(공학석사, 공학박사). 1985년 - 1999년 동명중공업(주)기술연구소 책임연구원. 1999년 - 현재 구미대학 조교수 재직중



이진걸 (李珍杰)

1940년 9월생. 1969년 건국대학교 축산학과 졸업. 1973년 일본 경도대학 대학원 공학석사. 1976년 동대학원 공학박사. 1977년 - 현재 부산대학교 기계공학부 교수 재직중