

# RLSM 방법을 이용한 전기 유압 서보 시스템의 파라미터 추정에 관한 연구

논문

60-8-9

## A Study on the Parameters Estimation of Electro-Hydraulic Servo Systems Using RMSM

김 병 우\* · 허 진†  
(Byeong-Woo Kim · Jin Hur)

**Abstract** - In this paper, linear discrete model of the electro-hydraulic servo system are made for parameters estimation. The parameters of electro-hydraulic servo system are estimated using the recursive least square method. Persistent excitation conditions are studied in order to estimate parameters of electro-hydraulic servo system to real values and parameters estimation affections are studied due to the forgetting factors variation. As the results, An parameter estimation method has been synthesized for minimizing the error between reference and error.

**Key Words** : Electro-hydraulic servo system, Parameter estimation, Recursive least squares method

### 1. 서 론

우주 항공 분야, 공작 기계 및 산업 기기 분야, 선박, 자동차 분야 그리고 군사 병기 분야 등의 고속, 고정밀도의 위치 결정 및 속도 제어 등에 널리 사용되고 있는 전기 유압 서보 시스템은 출력이 크고 다른 동력 시스템보다 응답성이 뛰어난 장점을 지닌 제어 시스템이다[1],[2]. 이러한 여러 가지 구동장치에 이용되고 있는 유압 서보 시스템은 고유의 비선형적인 특성 때문에 시스템의 정확한 수학적 모형을 구하기가 어려울 뿐만 아니라, 유압 구동장치의 운동에 있어서 외부 부하 및 속도의 변화가 발생한다. 그 동안의 연구에서는 상기 문제를 해결하기 위하여 적응제어 및 PID 제어와 같은 전통적인 방법을 사용하고 있으나 대상 시스템의 정확한 모델링에 걸리는 시간과 부정확성 때문에 일반 산업체에서 적용하는 데에는 한계성이 존재하였다[3],[4]. 또한, 기존 연구에서는 유압 시스템이 지니고 있는 비선형적인 특성을 충분히 반영하지 못하였기 때문에 실제 유압 시스템과 유압 해석 결과가 일부 상이하게 발생되었다[5].

본 연구의 목적은 전기 유압 서보 시스템의 이산화 모델을 구하고 시스템을 제어하기 위한 전기 유압 시스템의 파라미터들을 반복 최소 자승법(Recursive least squares algorithm, 이하 RLS)을 사용하여 추정하는 것이다. 시스템을 모델링하는 경우 많은 가정을 통해 수학적 모델을 구하게 되는 데 이렇게 구한 모델은 실제 모델과 오차를 반드시 수반하게 된다[5],[6].

또한 유압 시스템과 같은 비선형 시스템을 선형화 시켜

제어하는 과정에서도 오차가 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법의 하나로 시스템에 가해주는 입력 신호와 시스템에서 나오는 출력 신호를 가지고 시스템의 파라미터들을 추정하도록 하였다. 또한, 추정된 파라미터를 활용하여 시스템의 전달 함수를 알아내고 이러한 전달함수를 사용하여 시스템을 정확하게 제어할 수 있는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 전기 유압 서보 시스템의 이산화 모델을 구하고 이 모델을 실제 모델이라 가정하였다. 또한, 가정한 이산화 모델에 대하여 반복 최소 자승법을 사용하여 가정한 모델에 가해주는 입력 신호와 출력 신호를 가지고 실제 모델의 파라미터를 추정하였다. 또한 추정된 파라미터들이 실제 파라미터에 수렴하기 위한 조건들을 제시하였다.

### 2. 유압 시스템 해석

#### 2.1 시스템 모델링

유압 서보 시스템의 구성은 Fig. 1과 같이 서보 밸브, 유압 모터 및 부하, 센서 그리고 제어기 등으로 구성되어 있다. 유압 모터에 입력되는 작동유의 유량과 방향은 서보 밸브의 입력 전류의 크기와 방향으로 제어하여 유압 모터의 속도를 제어하며 타코미터(Tachometer)에서 측정된 모터의 속도,  $y(t)$ 는 출력 전압의 형태로 피드백되어 기준 신호인 기준 입력 전압,  $r(t)$ 과 비교된 후 그 오차 신호가 제어기를 통해서 서보 밸브를 구동시키는 입력 전류가 된다.

서보 밸브의 입력 전류  $I(s)$ 와 밸브의 변위  $x_v(s)$ 와의 관계를 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{x_v(s)}{I(s)} = \frac{K_1 K_2 / A_s K_f}{s \left[ 1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + \frac{s^2}{\omega_n^2} \right]} + \frac{K_2 K_w}{A_s K_f} \quad (1)$$

\* 정 회 원 : 울산대학교 전기공학부 부교수

† 교신저자, 시니어회원 : 울산대학교 전기공학부 조교수

E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr

접수일자 : 2011년 4월 4일

최종완료 : 2011년 7월 11일

입력 전류에 따른 스풀의 변위는 스풀의 스프링 상수와 감쇄비에 가장 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

스풀(Spool)의 동특성을 결정하는 부분은 전달함수 내의 가장 낮은 이탈 주파수(Break frequency)임을 고려하여 식 (1)을 식 (2)과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\frac{x_v(s)}{V(s)} = \frac{K_i K_1 K_2 / A_s K_f}{\tau_v s + 1} = \frac{K_{sv}}{\tau_v s + 1} \quad (2)$$

여기서  $K_i$ 는 DC증폭기 게인,  $\tau_v$ 는 서보 밸브의 시상수이다.

또한 각 밸브의 오리피스에 유량 방정식을 적용하여 각 포트에서의 유량을 구하면 식 (3)과 같다.

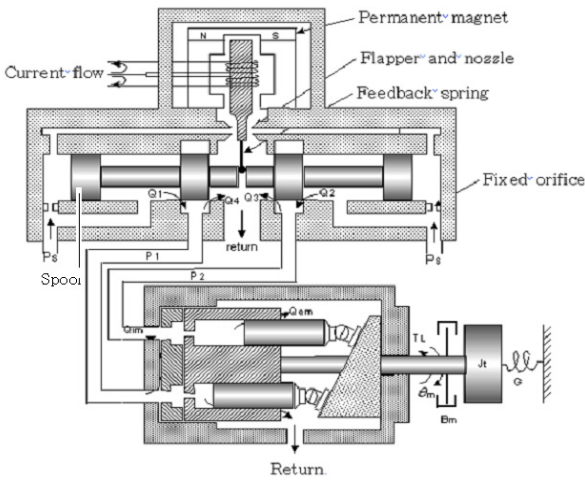


Fig. 1 서보 스풀 밸브 개략도  
Fig. 1 Configuration of servo-valve and motor

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{1}{2} C_d \omega x_v(t) (1 + \text{sign}(x_v)) \text{sign}(P_s - P_1(t)) \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_s - P_1(t)|} \\ Q_2 &= -\frac{1}{2} C_d \omega x_v(t) (1 - \text{sign}(x_v)) \text{sign}(P_2(t)) \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_2(t)|} \\ Q_3 &= \frac{1}{2} C_d \omega x_v(t) (1 + \text{sign}(x_v)) \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_2(t)|} \\ Q_4 &= -\frac{1}{2} C_d \omega x_v(t) (1 - \text{sign}(x_v)) \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_1(t)|} \end{aligned} \quad (3)$$

$$Q_A = Q_1 - Q_4 \quad Q_B = Q_3 - Q_2 \quad (4)$$

이러 하면, 부하유량,  $Q_L$ 은

$$\begin{aligned} Q_L &= \frac{1}{2} (Q_A + Q_B) = C_d \omega x_v \sqrt{\frac{1}{\rho} [P_s - \text{sign}(x_v) P_L]} \\ &= Q_L(x_v, P_L) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서  $x_v = P_L = Q_L = 0$  을 적용하여 Taylor 급수 전개를 하여 2 차항 이상을 무시하면 식 (6)과 같이 선형화 된다.

$$Q_L = \left. \frac{\partial Q_L}{\partial x_v} \right|_0 x_v + \left. \frac{\partial Q_L}{\partial P_L} \right|_0 P_L = K_q x_v - K_c P_L \quad (6)$$

또한, 유압 모터에 연속방정식을 적용하면

$$\begin{aligned} Q_1 - C_{im}(P_1 - P_2) - C_{em}P_1 &= \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dP_1}{dt} \\ C_{im}(P_1 - P_2) - C_{em}P_2 - Q_2 &= \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dP_2}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 유압 모터 각 실의 부피를 무시하고 부하 유량,  $Q_L$ 에 대하여 유량방정식을 적용하여 정리하면

$$\begin{aligned} Q_L = D_m \frac{d\theta_m}{dt} + C_{tm}(P_1 - P_2) + \frac{V_0}{2\beta_e} \frac{d(P_1 - P_2)}{dt} \\ + \frac{f_v(\theta_m)}{2\beta_e} \frac{d(P_1 + P_2)}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

$$Q_L = D_m s \theta_m + C_{tm} P_L + \frac{V_t}{4\beta_e} s P_L \quad (9)$$

유량  $Q_L$ 은 직경, 점성 마찰계수, 압력과 속도에 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

쿨롱 마찰력을 무시한 부하의 운동방정식을 유도하면 식 (10)과 같이 된다.

$$D_m P_L = J_t s^2 \theta_m + B_m s \theta_m + G \theta_m + T_L \quad (10)$$

식 (6)과 식 (9)를 정리하면

$$K_q x_v - K_c P_L = D_m s \theta_m + C_{tm} P_L + \frac{V_t}{4\beta_e} s P_L \quad (11)$$

식(10)을 식 (11)에 대입하여 정리하면

$$\theta_m = \frac{s \left( \frac{K_q}{D_m} x_v - \frac{K_{ce}}{D_m^2} \left( 1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s \right) T_L \right)}{\frac{V_t J_t}{4\beta_e D_m^2} s^3 + \left( \frac{K_{ce} J_t}{D_m^2} + \frac{B_m V_t}{4\beta_e D_m^2} \right) s^2 + \left( 1 + \frac{K_{ce} B_m}{D_m^2} + \frac{G V_t}{4\beta_e D_m^2} \right) s + \frac{G K_{ce}}{D_m^2}} \quad (12)$$

$$\theta_m = \frac{\frac{K_q}{D_m} x_v - \frac{K_{ce}}{D_m^2} \left( 1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s \right) T_L}{s \left( \frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h s}{\omega_h} + 1 \right)} \quad (13)$$

상기 식 (13)은 서보 밸브 시스템에서 발생하는 변위의 상관관계를 나타낸 것이다. 서보 밸브 시스템의 변위는 스프링 상수, 유속, 토크에 비례하여 발생된다.

## 2.2 시스템 파라미터 추정

일반적인 선형 시스템의 이산화 모델의 전달함수는 식 (14)와 같다.

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-1}B(q^{-1})u(t) \quad (14)$$

따라서 시스템의 출력  $y(t)$ 는 식 (15)과 같이 된다.

$$y(t) + a_1y(t-1) + a_2y(t-2) + \dots + a_ny(t-n) = b_0u(t-1) + b_1u(t-2) + \dots + b_mu(t-m-1) \quad (15)$$

$$y(t+1) = \Theta^T \Phi(t) \quad (16)$$

실제 파라미터와 추정된 파라미터와의 에러,  $e^0$  라 하면 식(17)과 같이 쓸 수 있다.

$$J(t) = \sum_{i=1}^t [y(i) - \hat{\Theta}(t)^T \Phi(i-1)]^2 = \sum_{i=1}^t e^0(i)^2 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(t)}{\partial \hat{\Theta}(t)} &= -2 \sum_{i=1}^t [y(i) - \hat{\Theta}(t)^T \Phi(i-1)] \Phi(i-1) \\ &= \sum_{i=1}^t y(i) \Phi(i-1) - \sum_{i=1}^t \Phi(i-1) \Phi(i-1)^T \hat{\Theta}(t) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

따라서 에러를 최소화하는 추정 파라미터들은 식 (19)와 같다.

$$\hat{\Theta}(t) = p(t) \left[ \sum_{i=1}^t y(i) \Phi(i-1) \right] \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \hat{\Theta}(t+1) &= p(t+1) \left[ \sum_{i=1}^t y(i) \Phi(i-1) + y(t+1) \Phi(t) \right] \\ &= p(t+1) \left[ p(t)^{-1} \hat{\Theta}(t) + p(t) \Phi(t)^T \hat{\Theta}(t) \right. \\ &\quad \left. - p(t) \Phi(t)^T \hat{\Theta}(t) + y(t+1) \Phi(t) \right] \\ &= \hat{\Theta}(t) + p(t+1) \Theta(t) [y(t+1) - \hat{\Theta}(t)^T \Phi(t)] \end{aligned} \quad (20)$$

도치 정리(inversion lemma)를 이용하고 인수(forgetting factor),  $\lambda_1$ 와  $\lambda_2$ 를 사용하면  $p(t+1)$ 은 식(21)과 같이 쓸 수 있으며 이를 식 (20)에 대입하면 식 (22)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} p(t+1) &= [\lambda_1(t)p(t)^{-1} + \lambda_2(t)\Phi(t)\Phi(t)^T]^{-1} \\ &= \frac{1}{\lambda_1(t)} \left[ p(t) - p(t)\Phi(t) \left( \frac{\lambda_1(t)}{\lambda_2(t)} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \Phi(t)^T p(t) \Phi(t) \right)^{-1} \Phi(t)^T p(t) \right] \\ &= \frac{1}{\lambda_1(t)} \left[ p(t) - \frac{p(t)\Phi(t)\Phi(t)^T p(t)}{\lambda_1(t)/\lambda_2(t) + \Phi(t)^T p(t)\Phi(t)} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\hat{\Theta}(t+1) = \hat{\Theta}(t) + \frac{p(t)\Phi(t)[y(t+1) - \hat{\Theta}(t)^T \Phi(t)]}{\lambda_1(t)/\lambda_2(t) + \Phi(t)^T p(t)\Phi(t)} \quad (22)$$

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 시스템의 서보 밸브의 전달 함수는

$$\frac{x_v(s)}{V(s)} = \frac{8.5 \times 10^{-4}}{2.3 \times 10^{-3}s + 1} \quad (23)$$

이고 유압 모터와 부하계의 전달 함수는

$$\Theta_m = \frac{1651559.668}{1.55963 \times 10^{-4}s^2 + 0.06447s + 1} \quad (24)$$

가 된다. 식 (23)과 식 (24)로부터 식 (25)과 같이 전기 유압 서보 시스템 플랜트의 전달 함수를 구할 수 있다. 여기에서  $s^3$ 의 계수는 매우 작으므로 무시하고 2차 시스템으로 모델링 할 수 있다. 식 (25)을 샘플링 시간(Sampling time) 0.05초로

하여 Zero order holder method로 이산화 시켜서 구한 전기 유압 서보 시스템의 이산화 전달 함수는 식 (26)과 같이 된다.

$$\frac{x_v(s)}{\Theta(s)} = \frac{1403.83}{0.0003s^2 + 0.06707s + 1} \quad (25)$$

$$\frac{x_v(z)}{\Theta(z)} = \frac{724.2854z + 54.0104}{z^2 - 0.4456z} \quad (26)$$

Fig. 3~Fig. 4는  $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 1$  의 경우 1V의 입력 신호에 주파수가 다른 3개의 정현파를 추가하여 입력 신호를 만들고 이를 시스템에 가한 경우의 실제 파라미터  $a_1, b_1$ 을 추정하는 결과를 나타내고 있다. 추정된 파라미터가 실제 파라미터와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

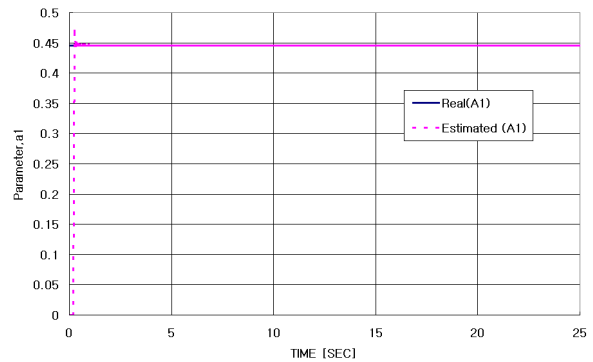


Fig. 3  $a_1$  변수 추정

Fig. 3  $a_1$  Parameter estimation

Fig. 5~Fig. 6은 1V의 입력 신호에 Persistent excitation 신호를 0,1,2,3,4개의 서로 다른 정현파 주파수를 추가한 경우의  $a_1, b_0, b_1$  파라미터들의 추정을 나타낸 것이다.  $b_1$  파라미터 추정을 이용한 경우에는 실제 값과 P.E 값이 일치되지 않음을 확인할 수 있는데, 이는  $b_1$  파라미터가 시스템 안정성에 기여하지 못하고 있기 때문이다. 반면에  $a_1$  파라미터는 비교적 양호하게 실제 값에 추정함을 알 수 있었다. 특히, 3개 이상의 Persistent excitation 신호를 입력 신호에 추가시켜야만 파라미터를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다. 따라서, 고차원으로 유도된 전기 유압 시스템에 대한 모델링은 이에 상응하는 고차의 독립 주파수 입력이 필요할 것이다.

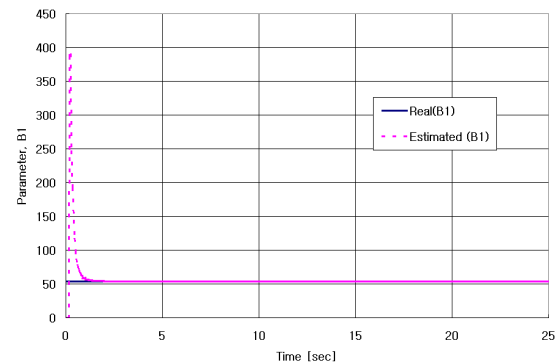


Fig 4  $b_1$  변수 추정

Fig. 4  $b_1$  Parameter estimation

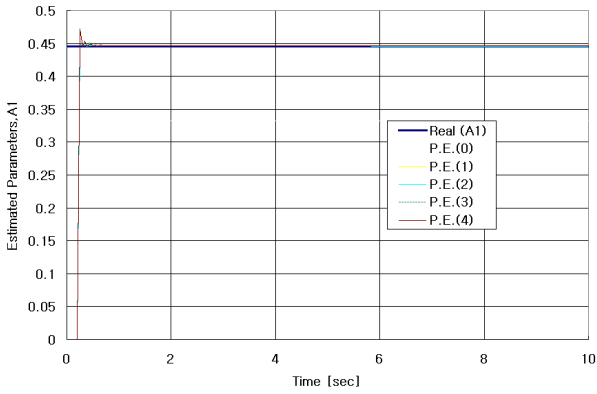


그림 5  $a_1$  변수 추정

Fig. 5  $a_1$  Parameter estimation (no persistent excitation)

Fig. 7~Fig. 10은  $\lambda_2$ 는 1로 고정된 후  $\lambda_1$ 을 변경시키면서 파라미터의 추정을 살펴보았다.  $\lambda_1$ 의 변경은 파라미터가 고정된 경우 파라미터의 추정에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. Fig.12~Fig.14는  $\lambda_1$ 는 1로 고정된 후  $\lambda_2$ 를 변경시키면서 파라미터의 추정을 살펴보았다.  $\lambda_2$ 의 변화 역시 파라미터의 추정에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

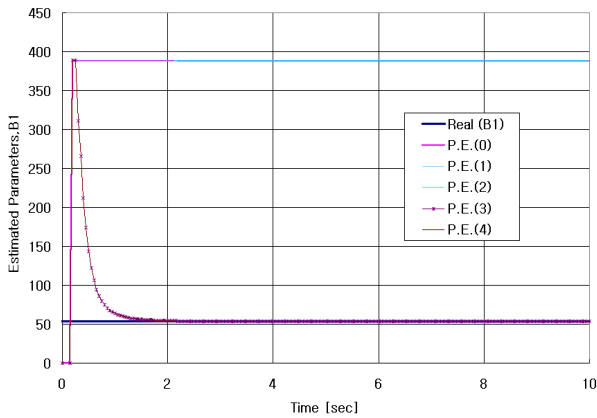


그림 6  $b_1$  변수 추정

Fig. 6  $b_1$  Parameter estimation (no persistent excitation)

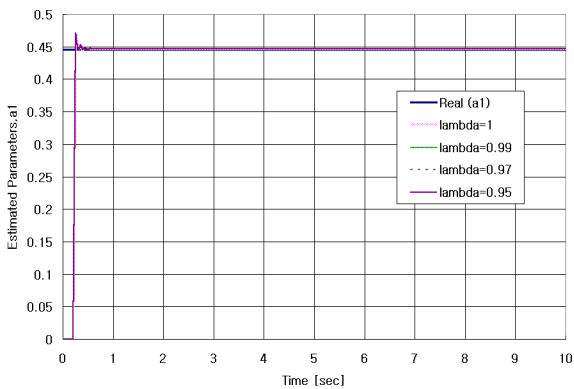


그림 7  $\lambda_1$ 에 의한  $a_1$  변수 추정

Fig. 7  $a_1$  Parameter estimation due to  $\lambda_1$  variation

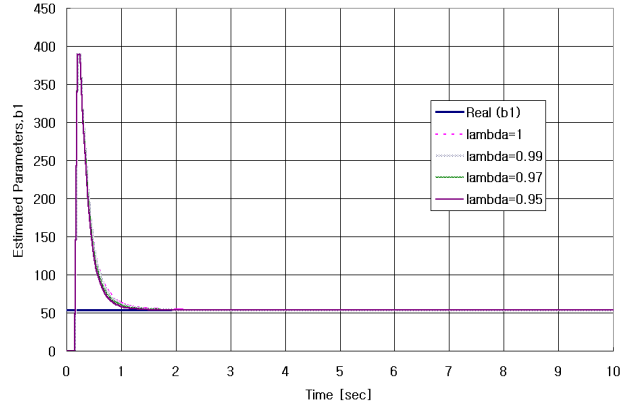


그림 8  $\lambda_1$ 에 의한  $b_1$  변수 추정

Fig. 8  $b_1$  Parameter estimation due to  $\lambda_1$  variation

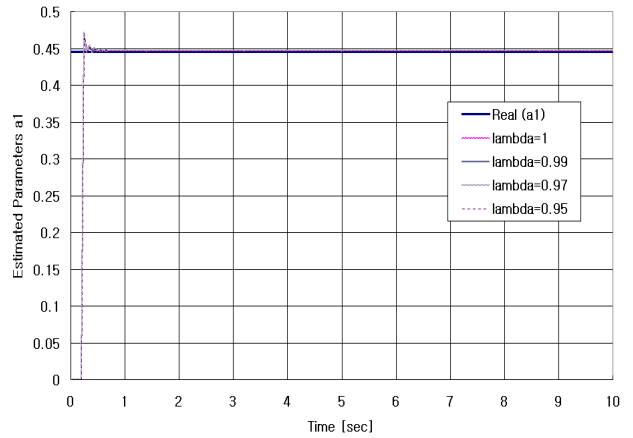


그림 9  $\lambda_2$ 에 의한  $a_1$  변수 추정

Fig. 9  $a_1$  Parameter estimation due to  $\lambda_2$  variation

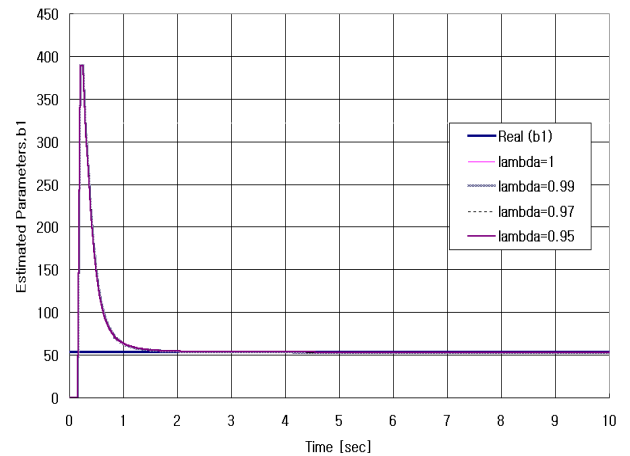


그림 10  $\lambda_2$ 에 의한  $b_1$  변수 추정

Fig. 10  $b_1$  Parameter estimation due to  $\lambda_2$  variation

상기 결과에서 알 수 있듯이,  $a_1$  파라미터에서는 공통적으로 실제 값에 잘 추정하고 있으나  $b_1$  파라미터는 실제 값에 추종 정도가 떨어짐을 알 수 있었다. 이는 일반적인 유압

서보 시스템에서 파라미터  $b_1$ 의 제어 적합성이 저하됨에 기인하는 현상으로 추정된다.

#### 4. 결 론

전기 유압 시스템에 대하여 기존에 수행하였던 수학적 모델링 방법을 탈피하여 파라미터 추정법을 이용한 시스템 모델링을 실시하였다. 이산시간 영역에서 전기 유압 시스템에 대한 파라미터 추정법의 해석결과는 실험결과와 대부분 일치함을 확인하였는바, 전기 유압 시스템에 대한 파라미터 추정법의 적용 가능성을 확인하였다.

2차로 모델링된 전기 유압 시스템인 경우, 파라미터법을 효과적으로 추정하기 위해서는 3개 이상의 독립 주파수를 입력 신호에 추가하여야 하였다. 따라서, 고차원으로 유도된 전기 유압 시스템에 대한 모델링은 이에 상응하는 고차의 독립 주파수 입력이 필요할 것이다. 그러나, 전기 유압 시스템에 대한 파라미터 추정에 대하여 Forgetting factor  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ 는 전회 영향을 끼치지 않는 설계인자로 작용됨을 확인하였다. 따라서, 향후 연구에서는 본 연구를 기반으로 하여 전기 유압 시스템에 대한 실질적인 제어 항목을 적용하여 다양성 확보를 추진하고자 한다.

#### 감사의 글

본 논문은 현대중공업 지원에 의한 울산대학교 전기공학부 일류화 연구비에 의하여 연구되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J.Watton, "Fluid Power Systems", Prentice-Hall co, 1989.
- [2] H.E.Merrit, "Hydraulic Control Systems", John Wiley co, 1967.
- [3] Ahn, K. K. and Chau, N. T., "Design og a robust force controller for the new mini motion package using quantative feedback theory,", Mechtronics, Vol. 17, No. 10, pp. 542-550, 2007.
- [4] Rahmfeld, R. and Ivantysynova, M., "Displacement Controlled Linear Actuator with Differential Cylinder A Way to Save Primary Energy in Mobile Machines," Proc. of the 5th int. Conf. on fluid power Transmission and Control, pp. 316-322, 2001.
- [5] Yao, B., Bu, F., Reedy, J. pp. Chiu, G., "Adaptive Robust Motion Control of Single Rod Hydraulic Actuators," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, pp. 316-322, 2001.
- [6] Anderson, J., Krus, P., and Wallace, D., "Multiobjective Optimization of Hydraulic Actuator System," Proc. of ASME Design Automation Conf., 2009.

### 저 자 소 개



#### 김 병 우 (金炳禹)

1965년 4월 15일생. 1987년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1990년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(석사). 2002년 한양대학교 정밀기계공학과(박사). 1989년 일본 KOSAKA연구소 초빙연구원. 1994~2006년 자동차부품연구원 전장기술연구센터장. 2006년~현재 울산대학교 전기전자정보 시스템공학부 In교수.

Tel : 052-259-1287

Fax : 052-259-1686

E-mail : bywokim@ulsan.ac.kr



#### 허 진 (許眞)

1999년 공학박사, 한양대(전기공학), 1999년~2000년 Texas A&M Univ. Post doc. Research Associate, 2000년~2001년 한양대 연구교수, 2002년~2008년 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터장, 2008년~현재 울산대 전기전자정보시스템 공학부조교수, 2004년~현재 IEEE Senior member, 2006년~현재, Associate Editor, IEEE Trans. on Power Electronics, 2008년~현재, Associate Editor, IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2008년~현재, IEEE Intelec 2009 Publication Chair.

E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr