

## 비례 솔레노이드 밸브의 운동해석 및 LQG/LTR 제어<sup>§</sup>

김기범\* · 김인수\* · 김영식\*<sup>†</sup> · 김준식\*\*

\* 금오공과대학교 기전공학과, \*\* 금오공과대학교 지능기계공학과

### Motion Analysis and LQG/LTR Control of a Proportional Solenoid Valve

Ki-Bum Kim\*, In-Soo Kim\*, Yeung-Shik Kim\*<sup>†</sup> and Jun-Sik Kim\*\*

\* Dept. of Mechatronics, Kumoh Nat'l Institute of Technology,

\*\* Dept. of Intelligent Mechanical Engineering, Kumoh Nat'l Institute of Technology

(Received May 26, 2011; Revised October 4, 2011; Accepted October 10, 2011)

**Key Words:** LQG/LTR Control(LQG/LTR 제어), Proportional Solenoid Valve(비례 솔레노이드 밸브), Dynamic Analysis(동특성 분석)

**초록:** 본 논문에서는 솔레노이드 밸브의 동특성 분석 후, 적분기가 추가된 LQG/LTR 제어기를 설계한다. 솔레노이드 밸브의 동특성은 백색잡음 입력 신호에 대한 출력응답을 측정하여 얻은 주파수 응답과 커브피팅을 통해 규명된다. 본 논문에서 적분기가 추가된 LQG/LTR 제어의 목적은 시스템의 응답성을 향상시킬 뿐만 아니라 복잡한 입력신호에 대한 추종 능력도 향상시키는 것이다. 마지막으로 실험을 통해 제어기의 성능이 검증되며, 성능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

**Abstract:** In this study, dynamic analysis of a proportional solenoid valve is performed, and an LQG/LTR controller with an integrator is designed to control the proportional solenoid valve. The dynamic characteristic of a valve is identified using experimental data by employing the frequency-domain modeling technique. The purpose of LQG/LTR control with an integrator is to enhance the system response and to improve the tracking accuracy for a complex input signal. Experimental tests are performed to verify the performance of the controller, and the results prove the high performance of the controller.

### 1. 서 론

비례 솔레노이드 밸브는 코일에 흐르는 전류에 비례하여 발생하는 전자기력을 이용해서 밸브를 작동시키는 구조를 가지며,<sup>(1)</sup> 입력신호에 비례한 출력(압력, 유량)의 제어가 가능한 밸브이다. 이것은 솔레노이드 밸브와 유사하지만 전류값에 비례해서 선형적으로 유량이 토출된다고 해서 비례제어밸브라고 부른다.<sup>(2,3)</sup>

비례 솔레노이드 밸브의 개도량의 조절은 입력되는 전기신호의 크기에 따라 개루프적으로 이루어지는데 이에 따라 밸브의 유동에서 히스테리시스(hysteresis)와 비선형성(nonlinearity)이 야기 될 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 밸브의 스

폴 변위를 측정하는 센서를 장착하여 폐루프 제어를 통해 밸브를 구동하는 방법이 사용되고 있다(Henke & Burton).<sup>(4)</sup> 밸브의 제어에는 PID 제어기가 일반적으로 사용되고 있는데 밸브의 비선형적 동특성과 파라미터 변동 등으로 인하여 밸브계가 원하는 성능에 도달하는 데에는 어느 정도의 한계를 보이고 있다. Vaughan 과 Gamble<sup>(5)</sup>은 보다 나은 밸브의 성능을 구현하기 위해 비선형 슬라이딩 모드 제어기를 도입했으며 제어계의 성능이 파라미터 변동과 외란에 둔감하게 유지될 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 유압시스템을 정밀 제어하는데 있어 중요 요소의 하나인 비례 솔레노이드 밸브를 고속, 고정밀도로 제어하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 밸브의 동특성을 주파수 영역에서의 커브 피팅(curve fitting) 방법으로 모델링하고 이에 기초하여 제어기는 LQG/LTR(linear quadratic gaussian control with loop transfer recovery) 기법을 통해 설계

§ 이 논문은 2011 년도 대한기계학회 동역학 및 제어부 문 춘계학술대회(2011.5.25-27, BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, yskim@kumoh.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

한다. 설계된 페루프 제어 시스템이 모델링 오차, 외란 및 불확실성에 강인하고 응답속도도 향상될 뿐만 아니라 다양한 형태의 기준 입력 신호에 대한 추종성능도 우수함을 실험을 통해 보일 것이다.

## 2. 밸브 모델링

### 2.1 밸브의 정적 특성 및 동적 특성

Fig. 1(a)는 본 연구의 제어대상인 Vickers 사의 KDG4V 계열 비례 밸브, 밸브를 구동하는 파워 앰프(EEA-PAM-520-A14)와 밸브 개폐의 정밀도를 측정하기 위해 밸브의 스톱에 부착된 LVDT 를 나타낸 것이다. Fig. 1(b)는 밸브의 정밀 위치 제어 시스템의 구성도이다. 밸브의 스톱 끝에 변위 센서를 설치하여 측정된 변위 신호는 고속 이산 처리 장치(dSPACE 1104)에 입력된다. 제어기는 고속 이산 처리 장치를 통해 제어기 출력인 전압을 발생시키고 밸브의 구동 앰프를 거쳐 밸브에 전류를 인가하여 밸브를 구동하게 된다. 제어기의 구동 샘플링 주파수는 밸브의 작동 주파수를 고려하여 500Hz 로 정하였다.

Fig. 2 는 밸브의 정특성으로 밸브 구동 앰프에 인가된 전압에 따른 밸브의 스톱 변위를 나타낸 것이다. 양극과 음극의 기울기, 불감대(dead zone)는 밸브 구동 앰프의 게인을 조절함으로써 변경할 수 있다.

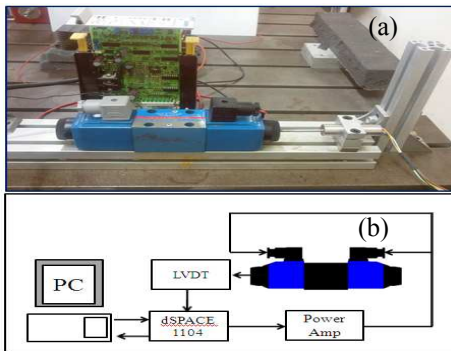


Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

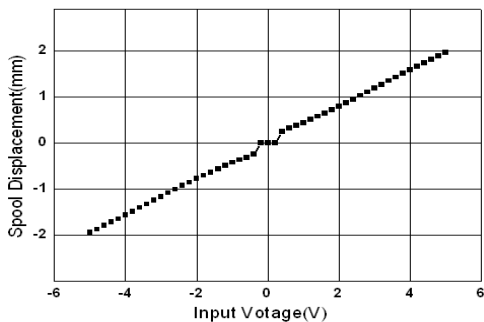


Fig. 2 Static characteristic of the proportional valve

Fig. 3 (a), (b)는 밸브의 동적 특성을 확인하기 위해 정현파에 대한 응답을 보인 것이다. 같은 크기의 전압을 인가했을 때, 주파수가 1Hz 인 경우는 기준입력에 잘 추종하나, 주파수가 10Hz 인 경우는 변위가 약 20% 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 사다리꼴 파형을 인가했을 때 밸브의 비선형 특성으로 인해 평평한 구간에서도 약 6%의 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다(Fig. 3(c) 참조). 본 연구에서는 페루프 밸브 제어계를 구성하여 대역폭이 적은 비례 밸브의 작동 대역폭을 향상시키고, 비례 솔레노이드의 히스테리시스 등 비선형 요소에 기인하는 부정확한 명령 추종성을 향상시키는 것을 목표로 한다.

### 2.2 시스템 모델링

본 연구에서의 비례 솔레노이드의 동적 특성의

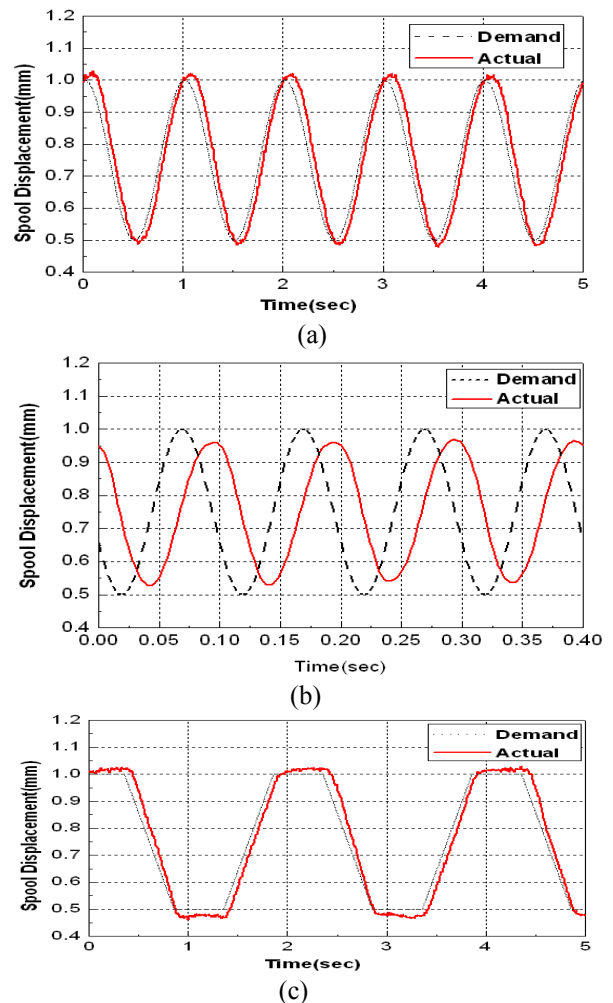


Fig. 3 Response of the uncontrolled system of (a) 1Hz, 0.25V sine, (b) 10Hz, 0.25V sine, (c) 0.5Hz, 0.25V trapezoid

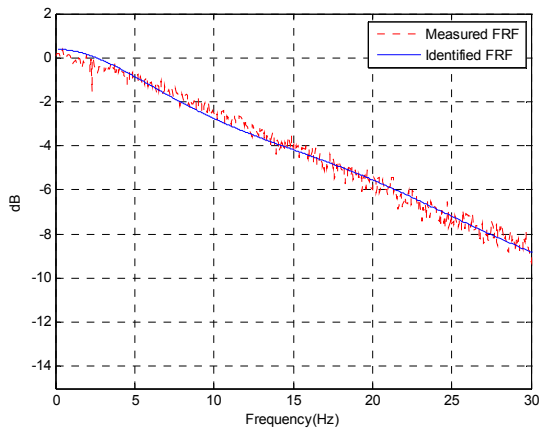


Fig. 4 Measured and identified FRF of the proportional valve

규명은 실험을 통해 주파수 응답을 측정하고 이를 행렬 분수 표현(matrix fraction description)을 이용하는 커브피팅 기법을 사용해서 가능한 낮은 차수의 수학적 모델을 얻음으로써 이루어진다. Fig. 4는 실험을 통해 측정된 비례 밸브의 주파수 응답과 규명된 모델 응답을 나타낸 것이다. 시스템 모델 차수는 3 차로 하였고 관심 주파수 영역은 밸브의 작동 대역폭을 고려하여 30Hz로 설정한다. 측정된 전달함수와 규명된 전달함수 사이의 모델링 오차 문제는 제어기 설계 과정에서 제어기에 강인성을 부여함으로써 해결할 수 있다.

### 3. 제어기 이론 및 설계

LQG/LTR 제어이론은 시스템의 주파수 대역 목표 성능 사양과 안정도 및 강인성 문제를 제어기 설계 시에 직접적으로 고려하기 위하여 개발된 대표적인 제어기법으로서 LQG 최적 제어기법으로부터 확대 발전되었고 현재 널리 응용되고 있다. 제어시스템의 설계절차는 크게 2 단계로 구분할 수 있는데 첫째 설계 대상 플랜트모델에 대하여 바람직한 루프형성이 되도록 목표필터루프(target filter loop)를 설계한다. 둘째 루프전달회복(loop transfer recovery)을 통하여 설계된 피드백 제어 시스템의 루프형상을 목표필터루프의 형상으로 회복시킨다.

#### 3.1 목표필터루프 설계

외란에 의해 유발되는 정상상태 오차를 제거하고 임의의 다양한 기준입력 신호에 대한 명령 추종성이 높은 서보 제어시스템을 설계하기 위해

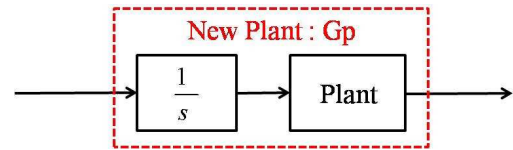


Fig. 5 New plant combined with an integrator

2.2 절에서 규명된 비례 밸브 모델에 식 (1)과 같이 적분요소를 첨가한 모델을 설계 플랜트 모델  $G_p$ 로 정의하기로 한다(Fig. 5 참조).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + L\xi(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + \mu\zeta(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $x$ 는 상태벡터,  $y$ 는 출력,  $u$ 는 입력이고  $A$ ,  $B$ ,  $C$  그리고  $D$ 는 설계 플랜트 모델을 상태방정식으로 나타내기 위한 시스템 행렬이며  $\xi$ 와  $\zeta$ 는 강도  $I$ 인 가상적 백색잡음이고  $\mu$ 와  $L$ 은 설계계수 행렬이다.

목표필터루프를 설계하기 위해 가상적인 센서잡음에 대한 Kalman 필터를 사용해서 다음과 같이 필터 이득 행렬  $H$ 를 구한다.

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x} + Bu + H[y - C\hat{x} - Du] \quad (2)$$

$$H = \frac{1}{\mu} PC^T \quad (3)$$

여기서  $\hat{x}$ 는 관측된 상태벡터이고  $P$ 는 식 (4)의 필터대수 Riccati 식으로부터 구한다.

$$AP + PA^T + LQ_1L^T - \frac{1}{\mu} PC^T CP = 0 \quad (4)$$

설계계수  $Q_1$ 은 가중행렬이고  $\mu$ 는 설계 플랜트 모델의 가상적인 센서잡음의 상호분산 크기이다.  $Q_1$ ,  $\mu$ ,  $L$ 을 선정하기 위해 Kalman 필터 주파수역 등가(Kalman filter frequency domain equality)<sup>(6)</sup> 관계를 이용하여 목표필터루프의 전달함수 행렬  $G_F$ 를 다음과 같이 근사적으로 구한다.

$$G_F \cong \frac{1}{\sqrt{\mu}} C(sI - A)^{-1} L + D \quad (5)$$

최적루프형성<sup>(7)</sup>을 이용하여 첨가되어 있는 적분요소만 남겨놓고 시스템의 모든 극점을 제거하여 바람직한 목표필터루프를 형성하는 설계계수  $L$ 을 선정할 수 있다.

3.2 루프전달회복

다음의 가격함수  $J$  를 최소화 하는 LQR(linear quadratic regulator)제어기법을 통하여 제어 이득 행렬  $G$  를 구할 수 있다.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Qx + u^T \frac{1}{\rho} u] dt \quad (6)$$

$$G = \frac{1}{\rho} B^T K \quad (7)$$

식 (7)의 제어이득행렬  $G$  를 구하기 위해서는 행렬  $K$  를 결정해야 하는데 이는 다음의 제어대수 Riccati 방정식으로부터 구할 수 있다.<sup>(8)</sup>

식 (8)의  $Q_2$  값과  $\rho$  를 조정해서 설계된 피드백 제어시스템 루프형상을 목표필터루프형상으로 회복시킬 수 있다. 목표필터루프 설계과정에서 구한  $H$  와 루프전달회복 과정에서 선정된  $G$  를 식 (9) 를 이용하여 결합시킴으로써 제어기 전달함수  $F$  를 구한다.

$$KA + A^T K + Q_2 - \frac{1}{\rho} KBB^T K = 0 \quad (8)$$

$$F(s) = G(sI - A + BG + HC)^{-1} H + D \quad (9)$$

설계 플랜트 모델과 LQG/LTR 제어기 구조는 Fig. 6 과 같이 표현된다.

4. 운동 제어 실험

4.1 비례 밸브의 LQG/LTR 제어

실험을 통해 규명된 비례 밸브계의 설계플랜트 모델  $G_p$  는 식 (10)과 같다.

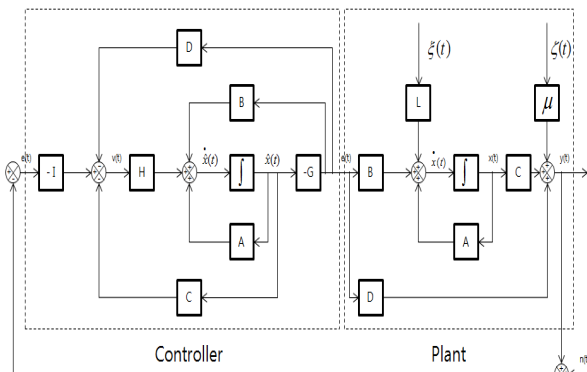


Fig. 6 Structure of the control system

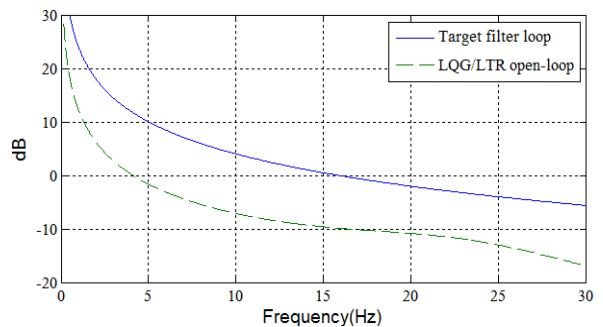
$$A = \begin{bmatrix} -2.1 \times 10^2 & -2.8 \times 10^4 & -9.8 \times 10^5 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [0.203 \quad -20.96 \quad -1430 \quad 1.02 \times 10^6], \quad D = 0 \quad (10)$$

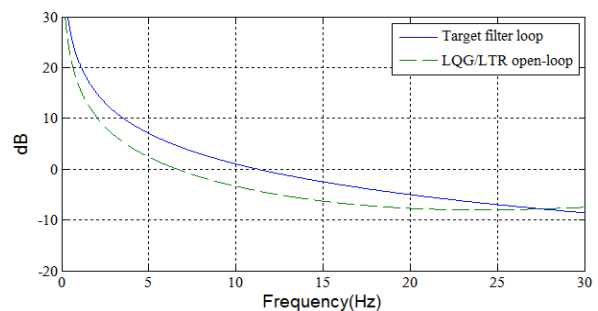
바람직한 목표 필터 루프의 설정과 회복을 위한 설계값들을 시행착오법을 통해서 Table 1 과 같이 설정하였다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)의 비교로부터 알 수 있는 바와 같이 경우 I 보다 경우 II 가 목표 필터 루프에 근접되어 있음을 확인할 수 있다. 이에 따라 실제 제어계의 설계는 경우 II 의 설계값들을 이용하여 이루어졌다. 설계된 Kalman 필터이득과 제어 이득은 식 (11), 식 (12)와 같이 표현된다.

Table 1 Design parameters of LQG/LTR control

Parameter	Design case I	Design case II
$\mu$	1e-4	1e-3.7
$Q_1$	1 * $CC^T$	1 * $CC^T$
$\rho$	1e-4	1e-8
$Q_2$	1 * $C^T C$	1 * $C^T C$



(a) Design case I



(b) Design case II

Fig. 7 FRF of the target filter loop and the open loop system

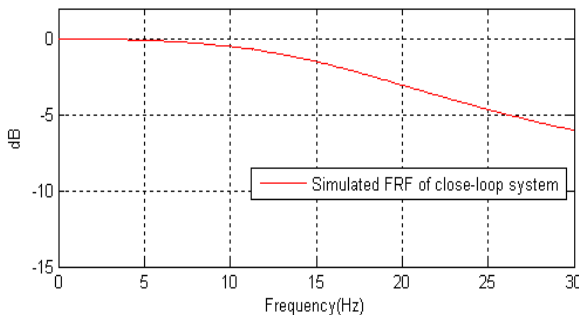
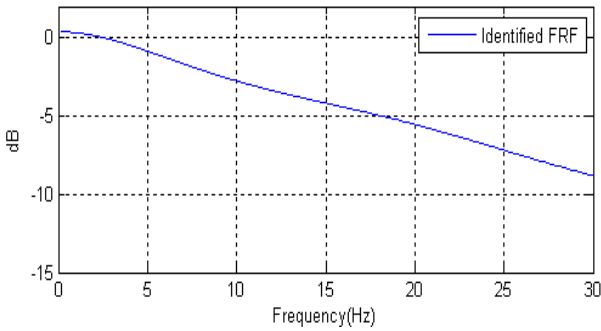


Fig. 8 FRF of identified system and simulated FRF of closed loop system

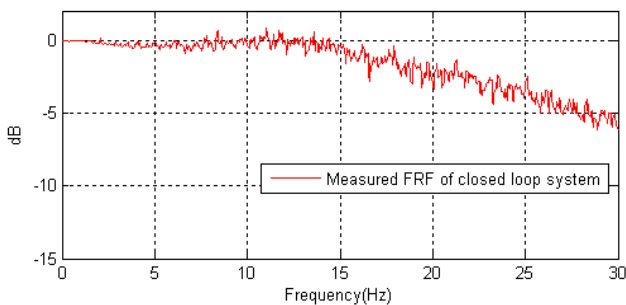


Fig. 9 Measured FRF of closed loop system

$$G = [2.23 \times 10^3 \quad 8.78 \times 10^5 \quad 1.51 \times 10^8 \quad 1.02 \times 10^{10}] \quad (11)$$

$$H = \begin{bmatrix} -5.03 \times 10^{-14} \\ 5.62 \times 10^{-16} \\ 3.75 \times 10^{-18} \\ 1.20 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Fig. 8 은 페루프 제어시스템의 주파수 대역 성능을 제어 전 시스템과 시뮬레이션을 통해 비교한 것으로 전체적으로 주파수 대역폭이 약 10Hz 정도 향상된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9 는 페루프 제어 시스템의 주파수 응답함수를 측정하는 것으로 시뮬레이션 결과와 비교해 볼 때 고주파 영역으로 갈수록 약간의 오차가 나타나고 있으나 전반적으로 유사함을 확인할 수 있다.

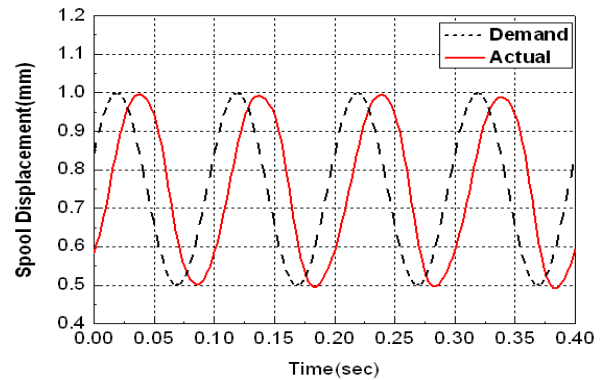


Fig. 10 Response of the closed loop control system of sine input

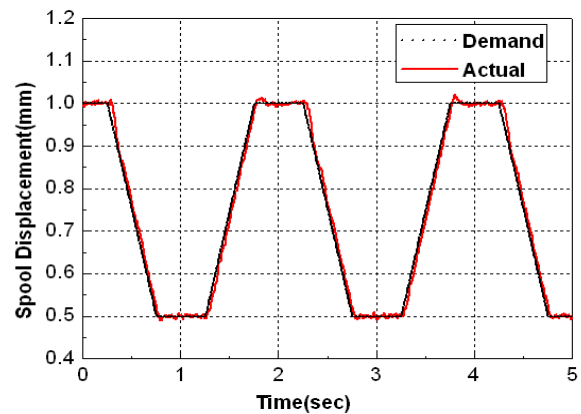


Fig. 11 Response of the closed loop control system of trapezoidal input

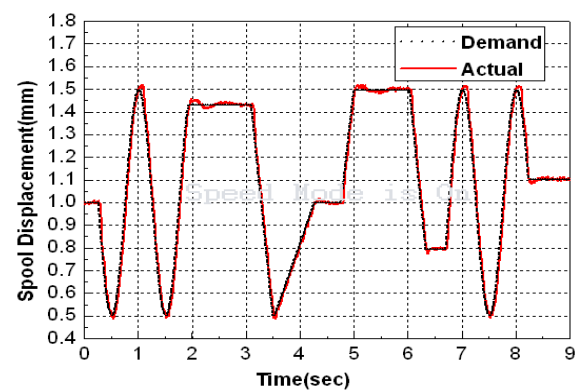


Fig. 12 Response of the closed loop control system of complex input

Fig. 10 은 페루프 제어 시스템에 10Hz 정현파를 인가했을 때 실험결과를 나타낸 것으로 Fig. 3(b)와 비교했을 때, 밸브계의 응답속도가 향상된 것을 시간 영역에서도 확인할 수 있다. Fig. 11 은 사다리꼴 기준 입력에 대한 응답으로 전반적으로 우수한 명령 추종성을 보이고 있으며 평평한 입력신호 부분에서의 약간의 응답오차는 측정된 센서 신호에 유

입된 잡음효과에 기인한 것으로 사료된다. Fig. 12는 램프, 정현파, 사다리꼴 파형 등이 포함된 복잡한 형태의 기준입력에 대한 페루프 제어 시스템에 대한 응답이다. 비례 밸브의 비선형 특성에도 불구하고 기준 입력에 대한 명령 추종성이 전반적으로 우수하게 나타남을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 비례 솔레노이드 밸브에 LQG/LTR 제어기법을 적용하여 페루프 밸브 제어계를 구성하였고 시뮬레이션 및 실험을 통해 다음을 확인할 수 있었다.

(1) 비례 솔레노이드 밸브의 주파수 응답특성은 실험 및 커브피팅을 통해 저 차수의 수학적 모델로 규명 가능하다.

(2) 규명된 밸브 모델에 적분기를 결합하여 LQG/LTR 제어기를 설계함으로써 다양한 기준입력신호에도 명령 추종성이 우수한 제어계를 구성할 수 있다.

(3) 솔레노이드의 비선형 특성 등에도 불구하고 LQG/LTR 제어기법을 적용함으로써 제어계의 강인성을 부여할 수 있으며 밸브의 응답속도의 향상도 기할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술 연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

## 참고문헌

- (1) Jung, G. H., 2010, "Dynamic Characteristics of Proportional Flow Control Valve with Large Capacity," *Trans. of The Korea Fluid Power Systems Society*, Vol.7, No. 1, pp. 20~27.
- (2) Lee, I. Y., Son, J. M., Shin, H. B., Son, J. H., 2009, "Modeling and Identification of Proportional Control Valve," *Trans. of The Korea Fluid Power Systems Society*, Vol.6, No. 3, pp. 10~17.
- (3) Yoon, S. N., Kim, D. G., Ham, Y. B., Park, J. H., Han, S. M., 2009, "A Study on the Performance Evaluation of a Proportional Pressure Control Valve," *Proceedings of the KSME*, pp. 931~936
- (4) Henke, R. W. and Burton, R. V., 1985, "Directional Control Valves for Profit Making Design," *Hydraulics and Pneumatics*, April, pp. 1-32.
- (5) Vaughan, N. D. and Gamble, J. B., 1992, "Sliding Mode Control of a Proportional Solenoid Valve," *Fluid Power Systems Modeling and Control*, ed. Burrows, C. R., Edge, K. A., Research Studies Press, Taunton, pp. 95~107.
- (6) Athans, M., 1986, "Lecture Notes on Multivariable Control System," M.I.T.
- (7) Kim, J. S., 1987, "Nonlinear Multivariable Control Using Statistical Linearization and Loop Transfer Recovery," Ph. D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, M.I.T.
- (8) Han, S. I. and Kim, J. S., 2003, "Nonlinear quadratic Gaussian Control with Loop Transfer Recovery," *Mechatronics* 13, pp. 273~293.