

유압을 이용한 도립진자의 LQ제어

LQ Control of Inverted Pendulum Using Hydraulic

정성원 · 허준영 · 이인석

S. W. Jung, J. Y. Huh and I. S. Rhee

접수일: 2010년 12월 02일, 수정일: 2011년 01월 28일, 게재확정일: 2011년 03월 25일

Key Words : Inverted Pendulum(도립진자), LQR control(LQR 제어), Electro hydraulic servo system(전기유압서보 시스템)

Abstract: An inverted pendulum mounted on a cart and actuated by a hydraulic servo cylinder was designed and built. Position information of the cart was acquired via a potentiometer and a angle of the pendulum was sensed by an incremental encoder. These were collected by a DAQ board and processed through the Real-Time Windows Target software(included in simulink). A simulink graphical program was implemented as a controller of the hydraulic system that governed the motion of the cart in order to maintain vertical balance of the inverted pendulum. The purpose of this study is to develop an electro-hydraulic inverted pendulum system for a modeling and controlling the intrinsic unstable system. The simulation results were compared with the experimental and verified.

기호 설명

- A_c : 실린더의 단면적(m^2)
- l : 진자의 길이(m)
- M : 카트의 질량(kg)
- m : 진자의 질량(kg)
- V : 실린더의 체적(m^3)
- g : 중력 가속도(m/s^2)
- β : 유압유의 체적탄성계수(N/m^2)
- P_L : 실린더의 부하압력
- $C_x \cdot K_V$: 전류변화에 대한 유량변화의 비(m^3/mAs)
- K_A : 전압변화에 대한 전류변화의 비(mA/V)
- K_V : 전류변화에 대한 스펴변위의 비(m/mA)
- K_P : 스펴변위에 대한 부하압력의 비(bar/m)
- K_{VP} : 전류변화에 대한 부하압력의 비(bar/mA)
- K_T : 실린더변위에 대한 전압변화의 비(V/m)
- C_f : 실린더의 점성마찰계수(Ns/m)
- C_p : 압력변화에 대한 유량변화의 비(m^5/Ns)

1. 서 론

도립진자는 적당한 제어력이 작용하지 않으면 항상 넘어지는 대표적인 불안정시스템으로 2족 보행로봇이나 이륙하려는 우주선 추진로켓(Space Booster)의 자세제어에 응용되고 있다. 1965년 Kapitza1)에 의해 처음 제안된 도립진자는 많은 연구자들에 의해 최적제어2), Neural Network3), 가변구조제어4), H_∞ 제어5)등 다양한 이론을 적용한 연구가 이뤄졌다. 고출력이 필요하지 않는 도립진자의 특성상 대부분의 연구에서 동력원으로 응답속도가 빠르고, 제어가 용이하며, 선형성이 우수한 전기모터시스템을 사용하고 있다. 이에 반해 전기유압서보시스템은 빠른 응답과 소형의 장치로 고출력을 낼 수 있으나 유량-압력특성, 밸브의 압력강하 등 비선형성이 크고 댐핑(Damping)이 낮아 불안정해지기 쉽기 때문에 동력원으로 사용된 관련연구가 거의 없다. 유압모터-밸브시스템을 이용한 회전형 도립진자로 White의 연구6)가 있었고, 유압실린더를 이용한 직선형 도립진자로는 Hovingh의 연구7)가 있었는데 이는 시스템의 비선형성으로 인해 수차례의 사이클 작동에서 실린더가 한쪽으로 조금씩 이동되는 문제가 있었다.

본 연구에서는 전기유압서보시스템을 이용한 직선형 도립진자시스템을 구성하였다. 유압서보밸브의 비선형 요소는 밸브 전류입력에 대한 부하압력의 비를

정성원(교신저자): 한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스 공학과

E-mail: hellolucia@kut.ac.kr, Tel: 041-560-1149

허준영, 이인석 : 한국기술대학교 메카트로닉스 공학부

실험적으로 구해 선형화 모델링하였고, 선형 2차 최적제어기법을 이용한 1형 서보시스템의 위치추종제어를 설계하여 정상상태오차가 없는 도립진자시스템을 구현하였다. 그리고 실험을 통해 설계한 시스템의 제어 성능을 평가하였다.

2. 시스템 구성

Fig. 1과 같은 직선형 도립진자를 구성하였다. 액추에이터는 편로드 유압실린더를 사용하였고 이로 인해 양쪽 수압면적이 달라 전.후진 방향에 따른 압력과 유량의 비선형성이 존재한다. 실린더는 전류구동 타입의 서보밸브로 제어되고, 공급포트에는 축압기가 설치되었다. 진자유닛의 카트 위치는 퍼텐쇼미터, 진자의 각도는 엔코더로 측정한다. MATLAB Simulink를 이용하여 실시간 제어를 구현하고, 각각의 제어신호와 센서신호는 DAQ Board로 입출력한다.

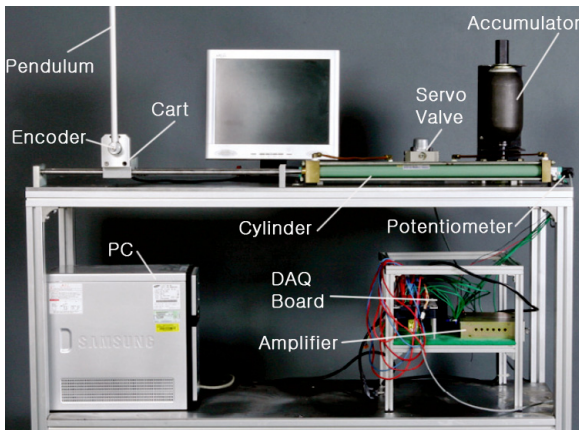


Fig. 1 Inverted Pendulum System

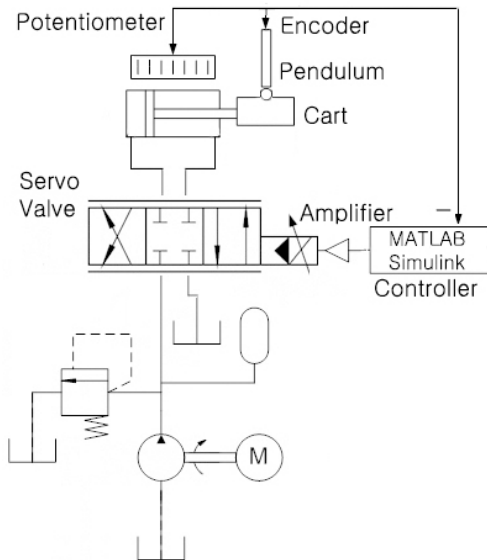


Fig. 2 System Circuit Diagram

Table 1 Specification of Experimental Apparatus

Equipment		Specification	
Power Pack	HK448 (Hawe)	Delivery Flowrate	13.3[lpm]
		Maximum Pressure	130[bar]
Cylinder		$\phi 25 \times \phi 12 \times 521$ [mm]	
Servo Valve	J076-102 (Moog)	Rated Flowrate	19[lpm]
		Rated Current	15[mA] (Parallel)
Amplifier	J121-001 (Moog)	Amp Gain	6[mA/V]
Accumulator		Bladder Type	
Encoder	E40HB6-5000 (Autonics)	Resolution	5000[Pulse/rev]
		Line Driver Output	
Potentiometer	LT-M-0600-S (Gefran)	Stroke	600[mm]
		Sensitivity	19.417[V/m]
DAQ Board	MF624 (Humusoft)	14bit A/D Converter Quadrature Input (ENC Ch.) Real-Time Windows Target	
PC		Intel Dual Core	

3. 시스템 모델링

3.1 시스템 운동방정식

진자유닛의 동역학적 모델링을 위해 우선 유압실린더 부위를 제외한 카트와 진자부분을 각각 자유물체도로 나타내고 위치 및 운동에너지를 이용한 라그랑주 함수(Lagrange's Function)를 적용⁸⁾하여 도식하면 Fig. 3, Fig. 4와 같다.

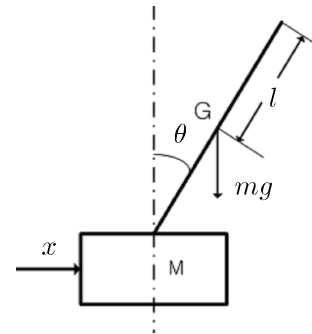


Fig. 3 Free-Body Diagram of Cart

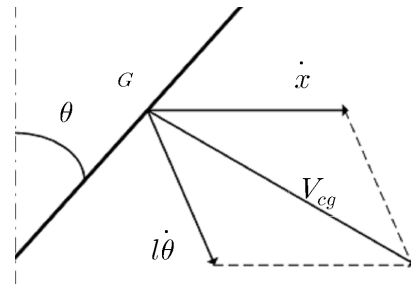


Fig. 4 Free-Body Diagram of Pendulum

라그랑주 함수에 의한 운동방정식을 수립하면, $L = T - V$ 이므로 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}mV_{cg}^2 + \frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 \quad (1)$$

$$V = mgl\cos\theta \quad (2)$$

$$L = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}mV_{cg}^2 + \frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 - mgl\cos\theta \quad (3)$$

여기서 V_{cg} 는 진자의 무게 중심에서의 속도벡터, J 는 진자의 관성모멘트이다. 이를 대입하여 라그랑지안 L 을 다시 쓰면,

$$L = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m[\dot{x}^2 + (l\dot{\theta})^2 + 2\dot{x}l\dot{\theta}\cos\theta] + \frac{1}{6}ml^2\dot{\theta}^2 - mgl\cos\theta \quad (4)$$

카트가 이동한 거리 x 와 진자의 기울어진 각도 θ 를 일반화된 좌표로 선정하고, 각각에 라그랑지안 (5), (7)을 적용하면 식 (6), (8)과 같은 비선형 운동방정식을 구할 수 있다. 여기서 F 는 카트에 가해지는 외력이다.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F \quad (5)$$

$$(M+m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta = F \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \theta}\right) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{4}{3}ml^2\ddot{\theta} + m\ddot{x}l\cos\theta - mgl\sin\theta = 0 \quad (8)$$

여기에 유압실린더의 운동방정식(9)에서,

$$F = A_c(P_1 - P_2) - C_f\dot{x} \quad (9)$$

양단의 압력 P_1 과 P_2 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1 = \frac{C_x x - A_c \dot{x}}{C_p + \frac{V_1}{\beta}s}, \quad P_2 = \frac{A_c \dot{x} - C_x x}{C_p + \frac{V_2}{\beta}s}$$

$V_1 = V_2 = V$ 이라하면

$$F = \frac{A_c C_x x_v}{R_a} - \frac{A_c^2 \dot{x}}{R_a} - \frac{A_c^2 \dot{x}}{R_a} + \frac{A_c C_x x_v}{R_a} - C_f \dot{x} = 2A_c \frac{C_x x_v - A_c \dot{x}}{R_a} - C_f \dot{x} \quad (10)$$

여기서, 스펴변위 x_v 와 오차전압 v_e , 입력전압 v_i , 출력전압 v_o , R_a 는 각각 아래와 같다.

$$x_v = K_A K_V v_e,$$

$$v_e = (v_i - v_o),$$

$$R_a = C_p + \frac{V}{\beta}s$$

따라서 독립진자시스템의 비선형 운동방정식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$(M+m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta = -\left(\frac{2A_c^2}{R_a} + C_f\right)\dot{x} + \frac{2A_c C_x K_A K_V}{R_a} v_e \quad (11)$$

$$\frac{4}{3}ml^2\ddot{\theta} + m\ddot{x}l\cos\theta = mgl\sin\theta \quad (12)$$

3.2 시스템 선형화

위에서 구한 독립진자시스템의 운동방정식 (11)과 (12)는 비선형 요소를 포함하고 있으므로 선형화가 요구된다. 진자가 기울어 질 때 생기는 각도 θ 는 매우 작은 값을 가지며 초기조건은 모두 0이라고 가정하고 선형화하면 다음과 같다.

$$(M+m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta} = -\left(\frac{2A_c^2}{R_a} + C_f\right)\dot{x} + \frac{2A_c C_x K_A K_V}{R_a} V_e \quad (13)$$

$$\frac{4}{3}ml^2\ddot{\theta} + m\ddot{x}l = mgl\theta \quad (14)$$

여기서 R_a 값의 s 는 라플라스 연산자이므로 좌변과 우변에 R_a 을 곱하여 전개하면 식은 2차에서 3차로 변하며 총 상태변수는 6개가 된다. 이 경우 식이 복잡해지므로 밸브에서의 동역학을 포함하는 P_1 , P_2 식을 사용하지 않고 단순화시키는 방안이 필요하다.

한편, 전류구동방식의 서보밸브에서 스펴변위에 대한 부하압력($P_L = P_1 - P_2$)의 변화율을 압력이득이라 하고 아래와 같이 정의된다.¹⁰⁾

$$K_P = \frac{\partial P_L}{\partial x_v} \quad (15)$$

Fig. 5는 전류구동방식의 서보액추에이터에서 신호흐름을 나타낸다. 오차전압(V_e)이 이득 K_A 를 갖는 밸브증폭기를 통과하면 전류(i)가 되며, 밸브에 가해지면 밸브이득 K_V 를 통하여 스펴변위(x_v)가 발생한다. x_v 가 압력이득 K_P 에 작용하면 부하압력 P_L 을 만들어낸다. 밸브이득 K_V 를 구하기는 어렵지만 밸브이

득(K_V)과 압력이득(K_P)의 곱을 K_{VP} 라고 하면 이는 서보밸브에 가해지는 입력전류(i)에 대한 액추에이터 양단의 압력을 측정하여 쉽게 구할 수 있다.

$$K_{VP} = K_V \cdot K_P = \frac{\partial \Delta P}{\partial i} \quad (16)$$

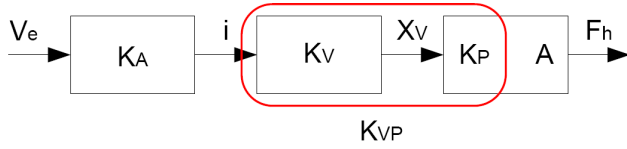


Fig. 5 Block Diagram of K_{VP}

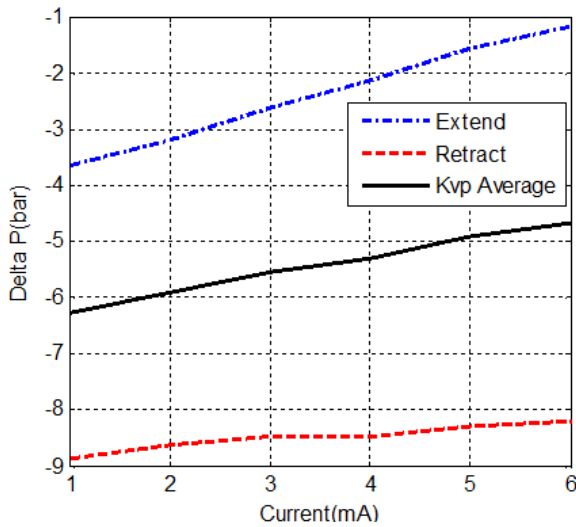


Fig. 6 Experiment Result of K_{VP}

K_{VP} 측정결과를 Fig. 6에 나타낸다. 편로드 실린더에서는 전.후진 방향 부하압력의 차이가 있으므로, 밸브에 가해지는 전류를 변화시키면서 각각의 부하 압력 P_L 을 측정하고 기울기를 계산하였다. 그리고 실린더 전.후진 방향에 따른 비선형성을 고려하여, 단면적 A_c 와 K_{VP} 를 전.후진 방향에 따라 다르게 적용하였다.

선형 모델

$$(A_c, K_{VP}) - Average$$

비선형 모델

$$(A_c, K_{VP}) \begin{cases} u < 0, Retract \\ u = 0, Average \\ u > 0, Extend \end{cases}$$

식 (16)을 적용하면 식 (13)을 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$(M+m)\ddot{x} + m\ddot{\theta} = (-C_f)\dot{x} + A_c K_A K_{VP} V_e \quad (17)$$

3.3 상태방정식

식 (14)와 (17)을 상태방정식으로 표현하기 위해 상태변수를 다음과 같이 선정한다.

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [\theta \ \dot{\theta} \ x \ \dot{x}]^T \quad (18)$$

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = k_1 x_1 + k_2 x_4 + k_3 u$$

$$\dot{x}_3 = x_4, \quad \dot{x}_4 = k_4 x_1 + k_5 x_4 + k_6 u \quad (19)$$

여기서, u 는 제어입력(서보밸브에 가해지는 오차 전압 V_e), x 는 카트의 이동변위, θ 는 진자의 기울어진 각도이다. 상수 k 의 값은 아래와 같다.

$$k_0 = (M+m)\left(\frac{4}{3}ml^2\right) - (ml)^2$$

$$k_1 = (M+m)(mgl)/k_0$$

$$k_2 = (C_f)(ml)/k_0$$

$$k_3 = -(A_c K_A K_{VP})(ml)/k_0$$

$$k_4 = -(ml)(mgl)/k_0$$

$$k_5 = -(C_f)\left(\frac{4}{3}ml^2\right)/k_0$$

$$k_6 = (A_c K_A K_{VP})\left(\frac{4}{3}ml^2\right)/k_0 \quad (20)$$

상태방정식을 구하면 식 (21)과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx \quad (21)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ k_1 & 0 & 0 & k_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_4 & 0 & 0 & k_5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ k_3 \\ 0 \\ k_6 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

Table 2은 독립진자시스템의 실제파라미터이다.

Table 2 System Parameter of Inverted Pendulum

A_c	Average	4.344e-4	m^2
	Extend	4.909e-4	
	Retract	3.778e-4	
M		1.644	kg
m		0.29	kg
l		0.5	m
g		9.81	m/s^2
C_f		250	$N/(m/s)$
K_{VP}	Average	3.1719e4	$(N/m^2)/mA$
	Extend	5.1028e4	
	Retract	1.2409e4	
K_T		19.417	V/m
K_A		6	mA/V

4. 제어기 설계 및 시뮬레이션

4.1 위치추종제어기 설계¹¹⁾

식 (21)과 같은 시스템에서 제어입력 u 를 식 (22)로 두는 위치추종제어기를 설계한다.

$$u = -Kx + k_I \xi \tag{22}$$

$$\dot{\xi} = r - y = r - Cx \tag{23}$$

여기서, K 는 피드백이득, k_I 는 적분이득, ξ 는 적분기의 출력, r 은 기준입력, y 는 시스템 출력이다.

Fig. 7은 위치추종제어기의 블록선도를 나타낸다. 오차보상기와 시스템 사이의 앞먹임경로에 적분기가 삽입된 1형 서보시스템이다.

시스템이 완전 상태 가제어인지 확인하기 위하여 식 (24)와 같은 가제어성 행렬(Controllability Matrix)을 정의한다.

$$C_o = [B \ AB \ A^2B \ A^3B] \tag{24}$$

식 (21)에서 구한 시스템의 계수(Rank)는 4이다. 가제어성 행렬 C_o 의 계수를 계산하면,

$$rank(C_o) = 4 \tag{25}$$

즉, 시스템은 완전 상태 가제어이다.

시스템이 완전 상태 가제어일 때, 식 (21)과 (23)을 결합하여 식 (26)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \\ &= \hat{A}x + \hat{B}u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \end{aligned} \tag{26}$$

식 (22)의 이득과 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{K} = [K \ -k_I] \tag{27}$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix} \tag{28}$$

작은 입력으로 빠른 응답을 얻을 수 있는 이득 \hat{K} 을 구하기 위하여 최적제어 이론인 선형 2차 최적제어(Linear Quadratic Optimal Control)법칙을 적용하였다. 최적제어를 위한 성능지수 J 는 다음과 같이 정의된다.

$$J = \int_0^\infty (\hat{x}^T Q \hat{x} + u^T R u) dt \tag{29}$$

여기서 선형 2차 최적제어는 시스템을 안정화시키면서 성능지수를 최소화시키는 이득 \hat{K} 을 구하는 문제이다. Q, R 은 오차와 에너지소모의 상대적 가중치를 결정하는 가중행렬이다. 식 (29)를 최소화하는 최적제어 법칙은 아래와 같다.

$$u = -\hat{K} \hat{x} = -R^{-1} \hat{B}^T P \hat{x} \tag{30}$$

P 는 식 (31)과 같은 리카티 방정식(Riccati Equation)을 만족해야 한다.

Table 3 LQ Parameter of Inverted Pendulum

Q	$diag[100 \ 0 \ 100 \ 0 \ 100]$
R	$[1]$
P	$\begin{bmatrix} 187.04 & 49.21 & 153.95 & 72.99 & -99.2 \\ 49.21 & 13.82 & 41.96 & 20.52 & -26.74 \\ 153.95 & 41.96 & 171.16 & 62.56 & -115.88 \\ 72.99 & 20.52 & 62.56 & 30.47 & -39.9 \\ -99.2 & -26.74 & -115.88 & -39.9 & 182.14 \end{bmatrix}$
Pole	$1e2 \times [-1.46 \ -0.075 \ -0.023 \pm 0.01j \ 4.47]$
\hat{K}	$\begin{bmatrix} K_\theta & K_\dot{\theta} & K_x & K_{\dot{x}} & -k_I \end{bmatrix}$ $= [-39.37 \ -9.92 \ -18.21 \ -14.61 \ 10]$

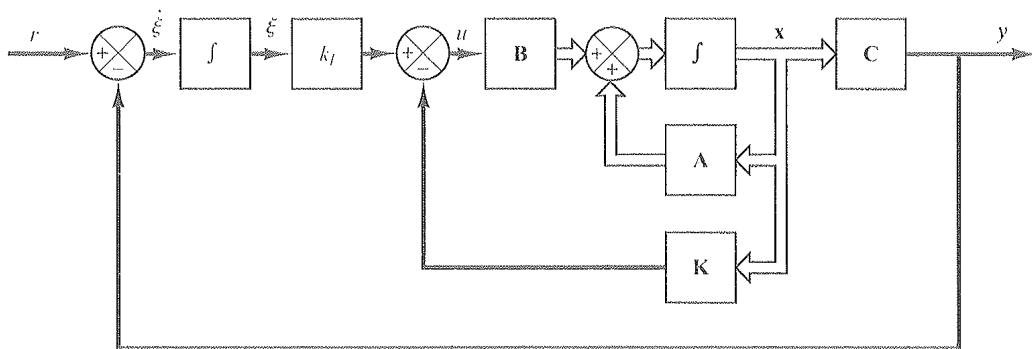


Fig. 7 Block Diagram of Position Tracking Control

$$\hat{A}^T P + P \hat{A} - P \hat{B} R^{-1} \hat{B}^T P + Q = 0 \quad (31)$$

시행착오를 거쳐 빠르고 안정적인 응답이 나오는 Q, R행렬을 결정하고 이득 \hat{K} 을 구하였다.

4.2 MATLAB 시뮬레이션

Table 3의 이득 \hat{K} 를 적용하여 독립진자시스템의 위치추종제어기 시뮬레이션을 수행하였다. 12)3장에서 설계한 선형 모델과 비선형 모델에 대하여, 각각 10초에서 30cm, 25초에서 -30cm로 계단응답을 가하고 카트와 진자의 시간응답을 확인하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 8과 같다.

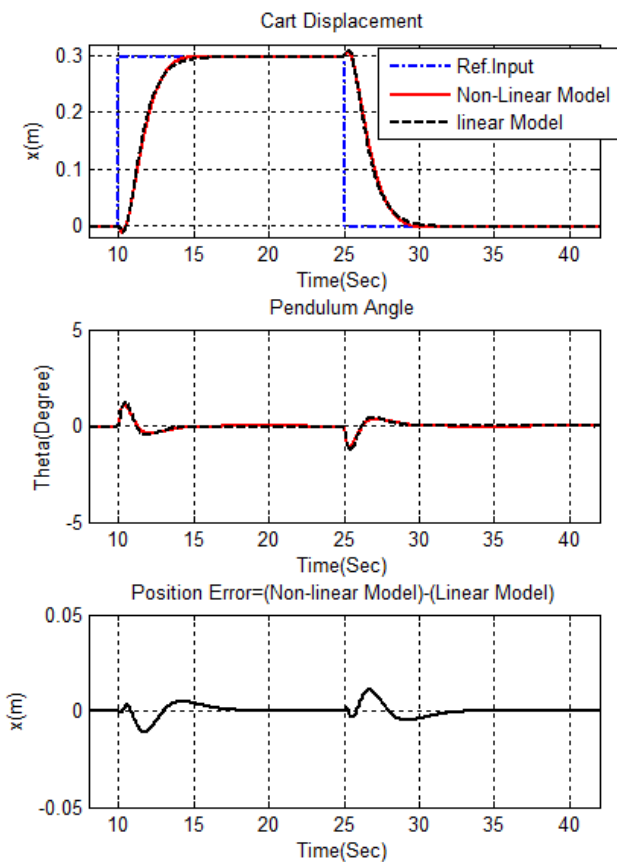


Fig. 8 Simulation Result (Using MATLAB Simulink)

카트는 초기에 입력 신호와 반대방향으로 움직이면서 진자를 1° 정도 기울인 다음, 진자의 독립 상태를 유지하면서 정상상태오차 없이 안정되게 목표 값으로 수렴한다. 정착시간은 약 5초이며 오버슈트는 거의 발생하지 않는다. 상태에 가중치를 많이 줬지만, 감쇠가 큰 응답을 보여준다. 이는 시스템의 극점에서 알 수 있는데, 카트의 변위와 속도에 해당하는 복소극이 시스템의 응답을 지배하고 있으며 ζ는 약 0.9로 댐핑이 큰 응답임을 알 수 있다.

선형 모델과 비선형 모델은 응답특성에서 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 카트의 변위가 발생하는 계단응답 구간에서 비선형 모델이 선형 모델에 비해 다소 응답지연이 있으나, 각 모델간의 최대 변위오차는 약 3.7%로 3장에서 설계한 선형 모델이 타당한 것을 시뮬레이션으로 확인하였다.

5. 실험결과 및 고찰

4.1절에서 고려한 제어기는 상태피드백 제어로 모든 상태를 측정할 수 있다고 가정 한 것이다. 하지만 실험에 사용된 독립진자시스템은 진자의 각도와 카트의 위치는 센서를 통하여 측정 가능하지만 속도와 가속도는 측정할 수 없다. 일반적으로 측정 불가능한 상태변수는 상태 추정기(State Estimator)를 사용하여 추정하지만, 본 실험에서는 측정된 각도와 위치를 직접 미분하고, 노이즈의 영향을 고려하여 저역 통과필터(Low-Pass Filter)를 사용하였다.

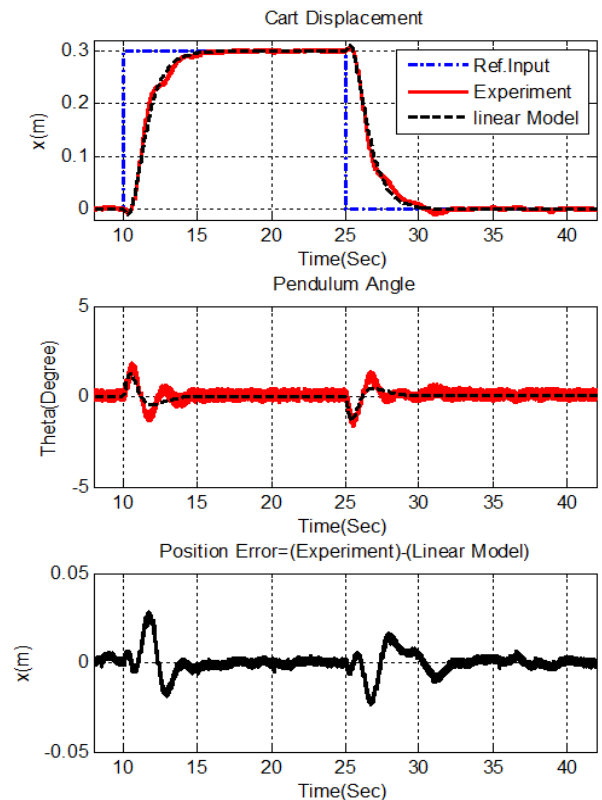


Fig. 9 Experiment Result

실험결과는 Fig. 9와 같다. 선형모델 시뮬레이션 결과와 유사한 움직임을 보이고, 정상상태 오차는 없으며 약 5초 후 오버슈트 없이 안정적으로 목표 값에 수렴함을 확인할 수 있다. 하지만 최대 변위오차가 약 9%로 시뮬레이션 결과보다 다소 크게 나타났다.

선형 2차 최적제어기의 가중행렬 Q, R 을 변경할 때, 적분이득에 해당하는 Q 의 값을 증가시키면 응답이 빨라지는 것을 알 수 있었다. 하지만 R 을 500배 이상 크게 하면, 실제 실험에서는 적분 오차로 인해 시스템이 발산한다. 카트의 위치와 진자의 각도에 해당하는 Q 의 값을 적분이득에 해당하는 Q 의 값과 비슷하게 유지하면 시스템의 감쇠비가 커지면서 안정적인 제어가 가능하였다.

편로드실린더를 액추에이터로 사용한 도립진자시스템의 특징상 전진에서의 시스템이득이 크고 후진에서의 시스템이득이 상대적으로 작은 비선형 문제가 발생한다. 시뮬레이션 결과에서는 이에 따른 선형화모델의 오차가 크지 않는 것으로 확인되었다. Fig. 9의 실험결과에서 카트변위(x) 오차는 Fig. 8의 시뮬레이션 오차와 유사한 응답을 보이고 있으나 최대오차가 2배 정도로 크게 나왔다. 그 원인으로서는 아날로그 방식의 앰프와 위치센서를 사용함으로 인해 생기는 노이즈를 제거하기 위해 저역 통과필터를 사용하였는데, 이로 인해 생기는 시스템의 위상지연과 실시간 OS의 실제 반응속도, 그리고 진자의 움직임에 대한 도립진자시스템이 설치된 작업대의 미소한 반동진동이 원인으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 부하압력의 변화율인 압력이득을 사용하여 전기유압서보시스템을 이용한 도립진자시스템의 간략화 모델링을 제안하고, 선형 2차 위치추종 최적제어기를 구성하여 시뮬레이션 및 실험을 한 결과, 실험결과는 선형모델 시뮬레이션 결과와 유사한 움직임을 보이고, 카트변위(x) 오차의 실험결과는 시뮬레이션 결과의 최대오차보다 2배 정도로 나왔지만, 시뮬레이션 오차와 유사한 응답을 보이고 있고, 정상상태오차 없이 약 5초 후 안정적으로 목표 값에 수렴함을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 전기유압서보시스템을 이용한 도립진자시스템에서 부하압력 P_L 에 관한 모델링을 단순화시키기 위해 제안한 밸브이득(K_V)과 압력이득(K_P)의 곱을 K_{VP} 라고 정의하여 서보밸브에 가해지는 입력전류(i)에 대한 액추에이터 양단의 압력을 측정하여 적용한 방법이 타당함을 보였다.

둘째, 전류변화에 대한 부하압력의 비(K_{VP})의 적용에 있어서 편로드 실린더의 전후진 방향에 따라 다른 값을 갖는 비선형모델과 수압면적 평균을 사용한 선형화모델은 각 모델간의 최대 변위오차는 약

3.7%로 응답에 영향을 주었으나 진자의 독립제어에는 크게 영향이 없었다.

향후 과제로 적응제어와 같은 다른 제어기법을 도입하고 개선된 필터를 적용하여 시스템의 응답성능을 향상시키고자 한다.

참고 문헌

- 1) S. Mori, H. Nishimura, K. Furuta, "Control of Unstable Mechanical System Control of Pendulum", INT. J. Control, Vol.23, No.5, pp. 673~692, 1976.
- 2) Q. Feng, K. Yamafuji, "Design and Simulation of Control Systems of an Inverted Pendulum", Robotica. Vol. 6, no. 3, pp. 235~241, 1988.
- 3) T. Miyagawa, T. Okayasu, Y. Ishida, "Neural Network-Based Model Reference Control for Inverted Pendulum", IEEE International Conference on Neural Networks, Vol.1, 640~644, 1995.
- 4) 한문섭, 허욱열, "도립 진자의 가변 구조 제어", 대한전자공학회 학술회의 논문집, pp. 54~57, 1988.
- 5) 김대현, 정규홍, 이석재, 이교일, " H_∞ 최적제어 이론을 이용한 도립진자의 견실한 보상기 설계에 관한 연구", 대한전자공학회 학술회의 논문집, pp. 213~218, 1991.
- 6) W. N. White, R. C. Fales, "Control of a Double Inverted Pendulum with Hydraulic Actuation: A Case Study" Proceedings of the American Control Conference, Vol. 1, pp.495~499, 1999.
- 7) A. Hovingh, M. Roon, "Design and Control of an Inverted Pendulum", Western Michigan University Project Report, 2007.
- 8) M. W. Spong, "Robot Modeling And Control", John Wiley & Sons inc, pp. 227~229, pp.240~241, 2006.
- 9) 허준영, "가변구조 제어를 이용한 유압굴삭기의 자동화에 관한 연구", 부산대학교 공학박사 학위논문, pp. 19~31, 1989.
- 10) C. Chen, "Linear System Theory And Design", 3th Ed., Oxford University Press, pp. 143~153, 2009.
- 11) Ogata, "Modern Control Engineering", 4th Ed., 사이텍 미디어, pp.828~911, 2003.
- 12) 권욱현, 한수희, "도립진자를 활용한 제어시스템 설계", 도서출판 아진, pp. 405~413, 2006.