



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

전기유압서보시스템의 위치제어기에
관한 연구



2011 年 2 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

沈昶守

工學碩士 學位論文

전기유압서보시스템의 위치제어기에
관한 연구

指導教授 裴 鍾 一

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2011 年 2 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

沈 昶 守

沈昶守의 工學碩士 學位論文을 認准함

2010 年 12 月



主審 工學博士 權 聖 烈 (印)

委員 工學博士 朴 瀚 錫 (印)

委員 工學博士 裴 鍾 一 (印)

목 차

목차	i
그림 목차	ii
표 목차	iii
Abstract	iv
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
제 2 장 본 론	2
2.1 확률선형화 이론	2
2.2 랜덤입력에 대한 비선형시스템 해석	6
2.3 확률선형시스템에 대한 LQG/LTR 제어이론	8
제 3 장 제어기 설계	13
3.1 서보시스템 구성	13
3.2 실시간 시스템 구현방법	20
3.3 시뮬레이션 및 고찰	14
제 4 장 결 론	26
참고 문헌	27

표 목차

표 1 터렛 서보 계수값 20



그림 목차

그림 1	확률 선형 추정자	2
그림 2	쿨롱 마찰력	4
그림 3	비선형 제어시스템 블록선도	9
그림 4	서보시스템 구성	15
그림 5	전기유압 위치제어 서보시스템 구성	16
그림 6	전기유압 위치제어 서보플랜트의 블록선도	20
그림 7	실시간 디지털 서보시스템의 구성도	21
그림 8	목표필터루프의 특이값선도	23
그림 9	비선형플랜트에 대한 선형제어기의 개루프특이값선도	23
그림 10	비선형 플랜트에 대한 선형제어기의 폐루프특이값선도	24
그림 11	비선형 플랜트에 대한 선형제어기의 표준화된 단위응답	24
그림 12	비선형플랜트에 대한 비선형제어기의 개루프 특이값선도	25
그림 13	비선형플랜트에 대한 비선형제어기의 폐루프 특이선도	25
그림 14	비선형플랜트에 대한 비선형제어기의 표준화된 단위응답	26

Controller Design of Electrohydraulic Servo System

Chang-Soo Sim

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

The statistical linearization method presented by Bootom is applied to LQG/LTR controller Design. Robust nonlinear controller design is discussed on nonlinear plant model with hard nonlinearity such as coulomb friction, saturation. A servo controller which can improve the performance of nonlinear electrohydraulic position control system is designed and implemented. The method is based on statistical linearization method the system with both gaussian and statistical character. obtaining the feedback control law which stabilizes the linear part of the original nonlinear system, and then readjusting the feed back gains using the describing function method to eliminate the limit cycle in the steady-state.

The dynamic characteristics and performance of the nonlinear control system with coulomb friction dominantly are analyzed by computer simulation, and compared with those of linear control system.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

제어시스템의 설계 목적은 설계플랜트모델에 대한 공칭안정도 및 모델링 오차에 대한 안정도-강인성을 보장하고 기준 입력에 대한 명령추종, 외란 제어 및 특정잡음에 대한 시스템의 성능을 향상시키는데 있다.

시스템의 작동속도가 빨라짐에 따라 모델링오차에 대한 강인성 문제가 중요시되고 있다. 단일입출력(Single-Input, Single-Output)시스템의 강인성 문제는 이득여유 및 위상여유를 이용하여 경험적으로 어느 정도 고려되었으나 설계단계에서 직접 고려할 수 없는 단점을 갖고 있다.

1970년대 후반 Safonov[1]로부터 강인성문제의 중요성이 강조되기 시작한 이후 강인한 제어기 설계에 관한 많은 연구결과들[2, 3, 4, 6]이 제시되었다. 대표적인 것으로 Doyle과 Stein[2]은 특이값 개념을 이용하여 LQG/LTR (Linear Quadratic Gaussian Control with Loop transfer Recovery)방법을 제시하였다. 이 방법을 이용하여 SISO 및 MIMO (Multi-Input, Multi-Output)선형제어시스템에 대하여 설계단계에서 모델링오차에 대한 강인성 문제를 직접 고려할 수 있게 되었다. 최근 제어시스템의 정밀제어에 대한 필요성이 증대되고 있으며 이러한 선형제어기의 한계성 때문에 비선형시스템에 대한 비선형제어기의 관심이 증대[8]되고 있다.

본 논문에서는 외란의 영향이 크고 모델화되지 않는 항(센서동력학, 굽힘 및 비틀림모드등)을 많이 내포하고 있으며 특히 무시할 수 없는 쿨롱마찰력을 포함하고 있는 서보메카니즘 대하여 Booton[11]이 제시한 확률선형화 이론(Statistical Linearization Theory)을 이용하여 설계플랜트모델을 3차 근사식으로 모델화하여 기존의 강인성제어기법인 LQG/LTR제어이론에 적용하여 선형제어기에서 발생하는 명령추종성능의 저하현상을 개선하는 방법을 제시하였다.

제 2 장 본 론

2.1 확률선형화이론

확률선형화기법[11]은 비선형시스템에 대한 확률적 응답을 예측하는데 사용된다. 이것은 비선형시스템과 추정자의 최소제곱오차(Minimum Mean Squared Error)를 이용하여 확률계수의 통계적 특성들을 가능한 한 근접하도록 하는 방법이다.

확률선형화기법에 의한 추정자의 개념으로는 그림1과 같다.

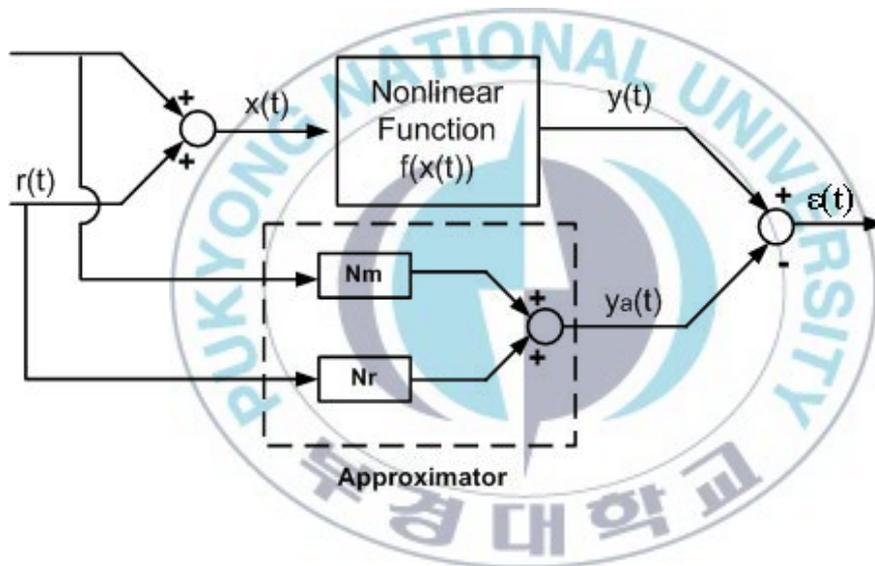


그림 1 확률 선형 추정자

Fig.1 Statistical linearized estimator.

비선형시스템의 추정응답은 식(1)과 같이 표시할 수 있다.

$$y_a(t) = N_m \cdot m(t) + N_r \cdot r(t) \tag{1}$$

여기에서 $m(t)$ 는 상태변수 $x(t)$ 의 기대값, $r(t)$ 는 랜덤변수 N_m, N_r 는 기술함수(Describing Function)의 이득을 나타낸다.

식(1)에서 N_m, N_r 는 비선형시스템과 추정자의 오차제곱이 최소화되도록 선정한다. 시스템오차 ($\epsilon(T)$)는 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon(t) \triangleq f(x(t)) - N_m \cdot m(t) - N_r \cdot r(t) \quad (2)$$

최소제곱오차를 만족하는 N_m, N_r 을 구하기 위하여 목적함수를 식(3)과 같이 정의한다.

$$J \triangleq E[\epsilon^2(t)] \quad (3)$$

여기에서

$$E[(\cdot)] = \int_{-\infty}^{\infty} (\cdot) p(x) dx,$$

$p(x)$ 는 상태변수 $x(t)$ 의 확률밀도함수(Probability Density Function)을 나타낸다. 식(3)에서 설정된 목적함수에 대하여 $\frac{\partial J}{\partial N_m} = \frac{\partial J}{\partial N_r} = 0$ 을 이용하여 최적의 N_m, N_r 을 구하면 다음과 같다.

$$N_m = \frac{E[f]}{m} \quad (4)$$

$$N_r = \frac{E[f \cdot r]}{E[r^2]} \quad (5)$$

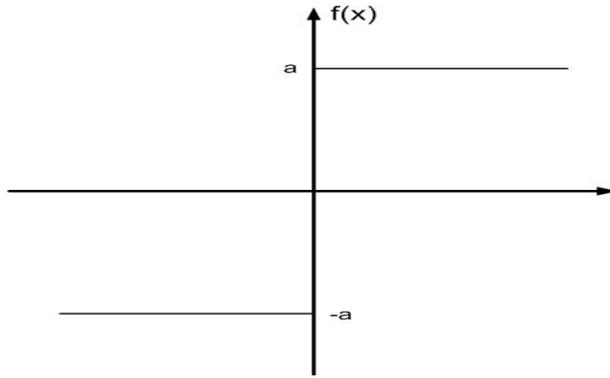


그림 2 쿨롱 마찰력
Fig. 2 Coulomb friction

그림 2와 같은 비선형요소인 쿨롱마찰력에 대한 N_m , N_r 를 구하기 위하여 상태변수 $x(t)$ 의 확률 밀도함수가 가우시안(Gaussian)이라고 가정한다.

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (6)$$

식 (6)에서 m 과 σ_x 는 상태변수 $x(t)$ 의 평균값과 분산을 각각 나타낸다. 식 (6)을 (5)에 대입하면 다음과 같다.

$$N_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x^3} \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} dx \quad (7)$$

여기에서

$$f(x) = a \cdot \text{sgn}(x) \quad (8)$$

을 나타낸다.

식 (8)을 식 (7)에 대입하고 적분하면 랜덤입력에 대한 최적계인 N_r 은 다음과 같다.

$$N_r = \frac{\sqrt{2/\pi} a}{\sigma_x} \quad (9)$$



2.2 랜덤입력에 대한 비선형시스템 해석

확률동적방정식(Stochastic Dynamic Equation)은 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), t) + \Gamma\omega(t) \quad (10)$$

식 (10)에서 $\omega(t)$ 는 잡음, Γ 는 잡음의 가중치를 나타낸다.

상태변수 $x(t)$ 는 확정신호 ($m(t)$)와 랜덤신호 ($r(t)$)의 합으로 표시된다고 가정하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$x(t) = m(t) + r(t) \quad (11)$$

식 (11)에서 랜덤신호 $r(t)$ 의 통계적 특성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[r(t)] &= 0 \\ E[r(t)r(t+\tau)] &= Q\delta(t-\tau) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (10)에서 $\omega(t)$ 는 식 (13)과 같이 표시된다.

$$\omega(t) = b(t) + \omega_r(t) \quad (13)$$

여기에는 $b(t)$ 는 확정신호, $\omega_r(t)$ 는 랜덤신호를 나타낸다.

식 (11)을 식 (12)에 대입하고 랜덤변수의 통계적특성을 이용하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\dot{m}(t) = E[f] + \Gamma b(t) \quad (14)$$

$$\dot{r}(t) = N_r r(t) + \Gamma\omega_r(t) \quad (15)$$

상태변수 $x(t)$ 의 상호분산행렬 X 는 식 (16)과 같다.

$$X \triangleq E[x(t) \cdot x^T(t)] = E[r \cdot r^T] \quad (16)$$

식 (16)을 시간에 대하여 미분하면 식(17)과 같은 상호 분산행렬전파식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= E[\dot{r}r^T] + E[r\dot{r}^T] \\ &= N_r X + X N_r^T + \Gamma \cdot E[\omega_r \cdot r^T] + E[r \cdot \omega_r^T] \Gamma^T \\ &= N_r X + X N_r^T + \Gamma Q \Gamma^T \end{aligned} \quad (17)$$

정상상태(Stationary State. $\dot{X}=0$)에 대한 상호분산전파식은 식 (18)로 표시되고, 특히 이 식을 Lyapunov 식이라고 한다.

$$N_r X + X N_r^T + \Gamma Q \Gamma^T = 0 \quad (18)$$

$$N_m m(t) + \Gamma b(t) = 0 \quad (19)$$

식 (18), 식 (19)는 서로 연성되어 있으므로 초기조건 즉, $m(0) = E[x(0)]$, $X(0) = E[r(0)r(0)^T]$ 에 대하여 식 (18), 식 (19)를 동시에 만족시키는 상태변수 $x(t)$ 의 통계적 특성을 구할 수 있다.

2.3 확률선형시스템에 대한 LQG/LTR 제어이론

확률선형시스템에 대한 LQG/LTR 제어를 설계하기 위하여 확률동적시스템을 다음과 같이 정의한다.

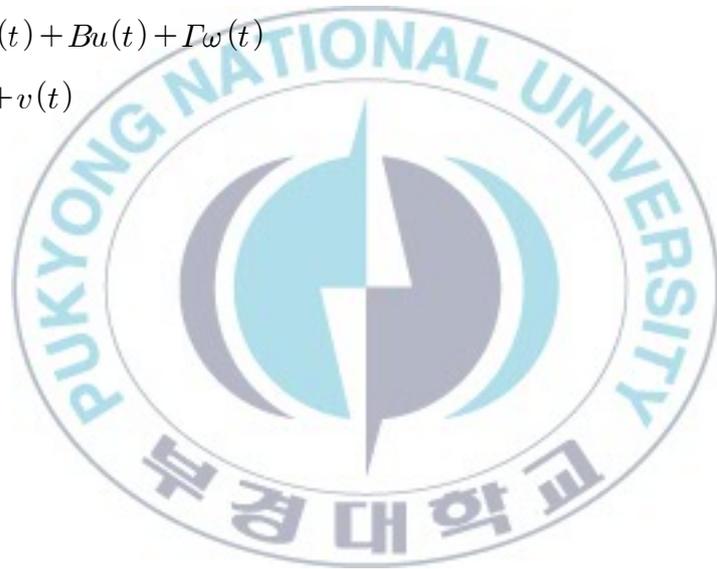
$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + Bu(t) + \Gamma\omega(t) \quad (20)$$

식(20)에서 $x(t) \in R^{n \times 1}$, $f(x(t)) \in R^{n \times 1}$, $B \in R^{n \times m}$, $u(t) \in R^{m \times 1}$, $\Gamma \in R^{n \times p}$, $\omega(t) \in R^{p \times 1}$ 를 나타낸다.

확률선형플랜트와 측정방정식은 식(21), 식(22)와 같다.

$$\dot{x}(t) = N(\sigma_x)x(t) + Bu(t) + \Gamma\omega(t) \quad (21)$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t) \quad (22)$$



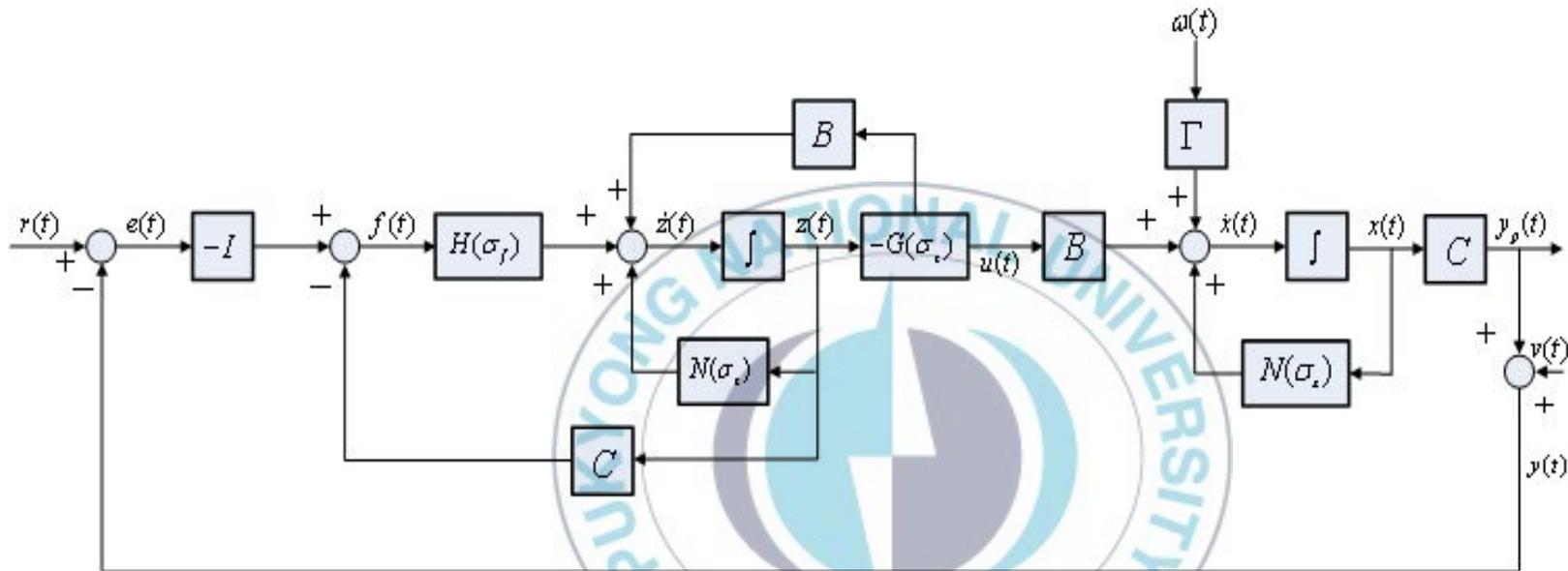


그림 3 비선형 제어시스템 블록선도
 Fig.3 Nonlinear Control System blockdiagram

식(22)에서 $C \in R^{m \times n}$, $v(t) \in R^{m \times 1}$ 의 차원을 갖는 측정행렬과 측정잡음을 각각 나타낸다. 보상기의 상태변수를 $z(t)$ 라 하면 제어입력은 식 (23)과 같이 표시된다.

$$u(t) = -Gz(t) \quad (23)$$

여기에서 $G \in R^{m \times n}$ 는 제어입력행렬을 나타낸다.

식 (21), (22)의 확률선형시스템에 대한 모델기준보상기의 다이내믹스는 식 (24)와 같이 표시된다.

$$\dot{z}(t) = N(\sigma_z)z(t) + Bu(t) + H(y(t) - Cz(t) - r(t)) \quad (24)$$

식(23)에서 $N(\sigma_z)$ 는 확률적으로 선형화된 보상기 행렬, σ_z 는 보상기상태 변수의 표준편차 그리고 H 는 $R^{m \times n}$ 의 차원을 갖는 필터계인행렬을 나타낸다.

식(21), (22), (24)에 대한 제어시스템의 블록선도는 그림3과 같다.

확률선형시스템에 대한 제어를 설계하기 위하여 식 (23)과 식 (24)에 표시된 제어계인행렬 G 와 필터계인행렬 H 를 선정하기 위하여 식(25)에 정의된 목적함수에 대하여 최적인 계인행렬값을 구해야 한다.

$$J = \frac{1}{2} E[x^T Q x + \rho u^T u] \quad (25)$$

식 (25)에서 Q 는 상태변수의 가정행렬, ρ 는 제어입력의 가중행렬을 나타낸다.

상태변수 $x(t)$ 와 보상기상태변수 $z(t)$ 의 오차를 $\tilde{x}(t)$ 라 정의 하고 $\tilde{x}(t)$ 에 대한 상호 분산전파식을 구하면 식(27)과 같다.

$$\tilde{x}(t) \triangleq x(t) - z(t) \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= E[\dot{\tilde{x}}\tilde{x}^T + \tilde{x}\dot{\tilde{x}}^T] \\ &= N\tilde{X} + \tilde{X}N^T + HRH^T + \Gamma\omega\Gamma^T - \tilde{X}C^TV^{-1}C\tilde{X}^T \\ &= (H - \tilde{X}C^TV^{-1})V(H - \tilde{X}C^TV^{-1})^T \end{aligned} \quad (27)$$

식 (26)에서 R은 양의 한정대칭행렬($R = R^T > 0$)인 제어가중행렬을 나타낸다. 식 (26)에서 상태추정오차공분산(\tilde{X})을 최소화 하는 필터계인행렬(H)은 식 (28)과 같이 표시된다.

$$H = \tilde{X}C^TV^{-1} \quad (28)$$

식 (28)에서 \tilde{X} 는 식 (27)의 상태추정오차 공분산행렬식에서 정상상태에 대한 다음의 선형대수 Riccati식으로부터 구할 수 있다.

$$N\tilde{X} + \tilde{X}N^T + HRH^T + \Gamma\omega\Gamma^T - \tilde{X}C^TV^{-1}C\tilde{X}^T = 0 \quad (29)$$

정상상태구속조건 즉 $\dot{X} = 0$ 을 고려하고 식(26)을 이용하면 식 (25)의 목적함수는 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$J^* = \text{tr} \left[\frac{1}{2} (Q + \rho G^TG)X + \dot{X}\Lambda^T \right] \quad (30)$$

식 (30)에서 Λ 는 라그랑제(LAgrange)곱수를 나타낸다. 그리고 정상상태 구속조건 식은 식 (31)과 같이 표시된다.

$$\dot{X} = (N - BG)X + X(N - BG)^T + \Gamma\omega\Gamma = 0 \quad (31)$$

최적의 제어계인행렬을 구하기 위한 필요조건은 식 (32)와 같다.

$$\frac{\partial J^*}{\partial G} = \frac{\partial J^*}{\partial X} = \frac{\partial J^*}{\partial \Lambda} = 0 \quad (32)$$

식 (30)과 식 (32)로부터 최적제어계인행렬 (G)는 식 (33)과 같이 표시된다.

$$G = \frac{1}{\rho} B^T S \quad (33)$$

여기에서 $S = \Lambda$ 를 나타낸다.

식 (33)에서 S 는 Riccati식에서 보상항인 Ψ_{ij} 가 첨가된 Riccati식으로부터 구할 수 있다.

$$Q + SN + N^T S - \frac{1}{\rho} S B B^T S + \Psi_{ij} = 0 \quad (34)$$

식 (34)에서 $\Psi_{ij} = 2tr \left[S \frac{\partial N}{\partial X_{ij}} X \right]$ 를 나타낸다.

식 (28), 식 (33)으로부터 최적의 계인행렬을 구한 후 가정한 N에 대하여 식 (31)의 구속조건에 대한 Lyapunov식으로부터 구한 N' 과 비교하여 $N' \simeq N$ 가 만족하도록 반복설계함으로써 최적의 계인행렬을 구해야 한다.

제 3 장 제어기 설계

3.1 서보시스템 구성

플랜트모델인 서보메카니즘은 그림4와 같이 서보증폭기, 토크모터, 유압모터, 감속기어 및 부하로 구성되어 있다.

부하축의 비틀림상수(K)의 효과를 무시할 수 있으면 (즉, $K \gg 1$) 회전자(Rotor)축에 대한 등가관성모멘트는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} J_{eq} &= J_M + J_L/n^2 \\ F_{eq} &= F_M + F_L/n^2 \end{aligned} \quad (35)$$

여기에서 J_M 은 모터회전자의 관성모멘트, F_M 은 모터회전자의 점성마찰력, J_L 은 부하의 관성모멘트, F_L 은 부하의 점성마찰력 그리고 n 은 감속기어비를 나타낸다.

그림5는 싱크로(synchro)를 이용한 전기유압 위치제어 서보시스템의 구성도를 나타낸다.

파워 증폭기(Power Amplifier)의 입력전압 e_g 와 서보밸브 스펴(Spool)변위 X_V 의 전달함수는 식 (36)과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{X_V}{e_g} = \frac{K_s}{\left[\frac{s}{\omega_1} + 1 \right] \left[\frac{s}{\omega_2} + 1 \right] \left[\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2\delta_0}{\omega_0} + 1 \right]} \quad (36)$$

여기에서 K_s 는 서버벨브와 증폭기의 이득상수, ω_1 은 토크모터의 시정수, ω_2 는 스플의 시정수 그리고 ω_0 , δ_0 는 토크모터의 고유주파수 및 댐핑계수를 나타낸다.

서버모터 및 부하의 다이내믹스를 고려하여 스플변위와 출력변위 θ_0 사이의 전달함수는 식(37)과 같이 표시된다.



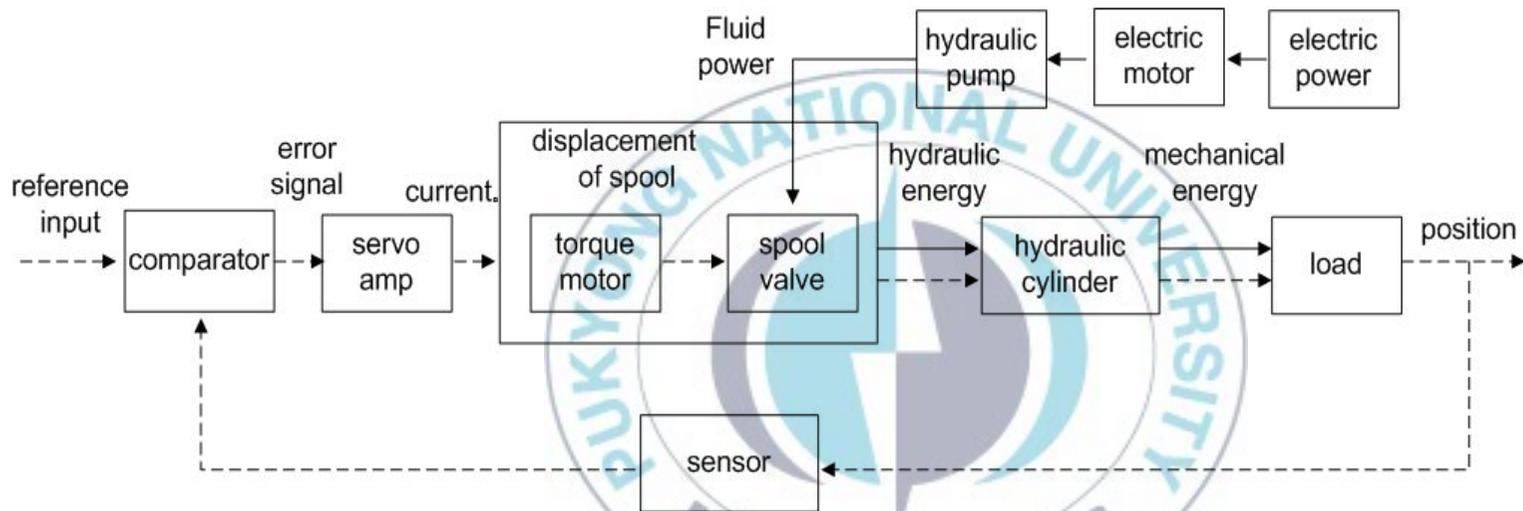


그림 4 서보시스템구성

Fig.4 Schematic of servo system

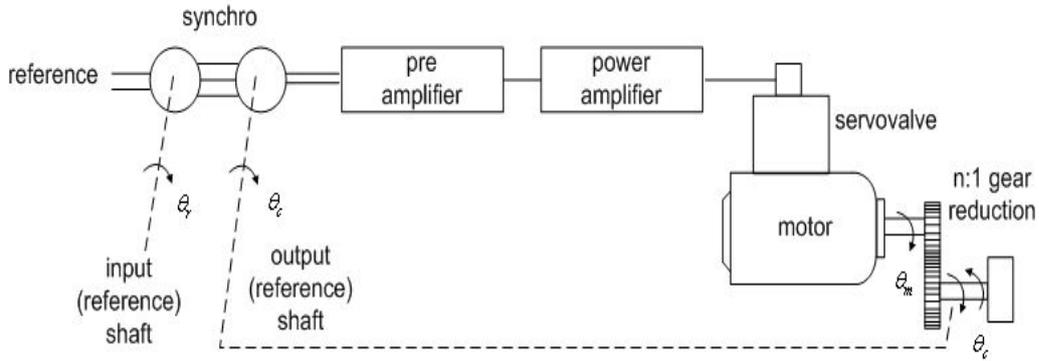


그림 5 전기유압 위치제어 서보시스템 구성

Fig.5 Schematic of electrohydraulic position control servo

$$\theta_m = \frac{n \frac{K_q}{D_m} X_V - \frac{K_{ce}}{D_m^2} \left[1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s \right] \frac{T_L}{n}}{s \left[\frac{s}{\omega_3} + 1 \right]} \quad (37)$$

식(37)에서 ω_3 는 유압계의 고유주파수, D_m 은 유압모터의 토출유량 (in^3/rad), β_e 는 시스템 유체의 체적탄성계수, V_t 는 누설계수, K_q 는 스톱밸브의 유량이득, K_{ce} 는 스톱밸브의 유량-압력계수 그리고 n 는 감속 기어비를 나타낸다.

식(36)과 식(37)에서 토크모터의 다이내믹스는 부하의 다이내믹스와 비교하여 무시할 수 있으므로 토크모터의 스톱의 시정수만을 고려하면 식(36)은 식(38)과 같이 1차계로 모델링할 수 있다.

$$\frac{X_V}{e_g} = \frac{K_s}{\left[\frac{s}{\omega_1} + 1 \right] \left[\frac{s}{\omega_1} + 1 \right]} \quad (38)$$

그림6은 전기유압 위치제어 서보플랜트의 블록선도를 나타낸다.
그림6의 플랜트모델에 대한 확률선형모델식은 식(39)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_p(t) &= N_p(\sigma_f)x_p(t) + B_p u_p(t) \\ y_p(t) &= C_p x_p(t) \end{aligned} \quad (39)$$

여기에서

$$N_p(\sigma_f) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\omega_3 + \omega_3 N(\sigma_x)}{N(\sigma_x)} & \frac{\omega_3 - \omega_2}{N(\sigma_x)} & \frac{\omega_2}{N(\sigma_x)} \\ 0 & 0 & -\omega_2 & \omega_2 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_1 \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega_1 K_e K_d K_s \end{bmatrix}$$

$C_p = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 을 나타낸다.

식(39)에서 $N(\sigma_x)$ 는 랜덤입력에 대한 쿨롱마찰력의 확률선형화 이득을 나타낸다. 확률선형제어기에 대한 설계사양을 다음과 같이 설정한다.

설계사양 1). 0 정상상태오차

설계사양 2). 교차주파수 $\cong 50$ rad/sec

설계사양 3). 양호한 명령추종 및 외란제거 성능

설계사양 4). 출력측으로 반영된 모델링오차 ($E(j\omega)$)에 대하여 아래와 같은 안정도 -강인성조건을 만족시키는 시스템

$$\sigma_{\max}[E(j\omega)] < \frac{\omega}{50}$$

시스템의 관련 계수값으로 ω_1 은 220 rad/sec, ω_2 는 133 rad/sec, ω_3 은 0.07 rad/sec 그리고 감속기어비는 160을 사용하였다.

식 (28), (29)로부터 설계사양 2)를 만족하는 최적의 필터게인행렬을 구한 결과는 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.47 \\ 63.14 \\ 2.63 \\ 2.87 \end{bmatrix} \quad (40)$$

10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-7} 의 강도를 갖는 랜덤명령입력에 대하여 식 (33), (34)로부터 구한 N 와 식 (31)에 대한 Lyapunov식으로부터 N' 의 오차를 최소화 하는 제어게인행렬 G 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G &= [G_1 \ G_2 \ G_3 \ G_4] \\ &= [76.76 \ 2.34 \ 0.17 \ 0.58] \end{aligned} \quad (41)$$



표1. 터렛 서보 계수값

Table 1. Turret servo parameter values

Component	Description	Parameter	unit	value
Amplifier	Gain	K_1		2300
	Input Resistance	R_k	ohm	0.8
	Input Inductance/Resistance	T_k	sec	0.0045
Motor	Torque Constant	K_T	Nm/A	0.25
	Inertia	J_M	Kg m	0.007
	Viscous Friction	F_M	Nm s/rad	0.003
	emf Constant	K_E	v s/rad	0.3
	Amature Inductance	L_m	Herny	0.0015
	Amature Resistance	R_m	Ohm	0.2
Turret Load	Inertia	J_L	kg m	5600
	Viscous Friction	F_L	N ms/rad	400
	Gearbox Ration	n		160
Rate Gyro	Gyro Constant	K_g		10

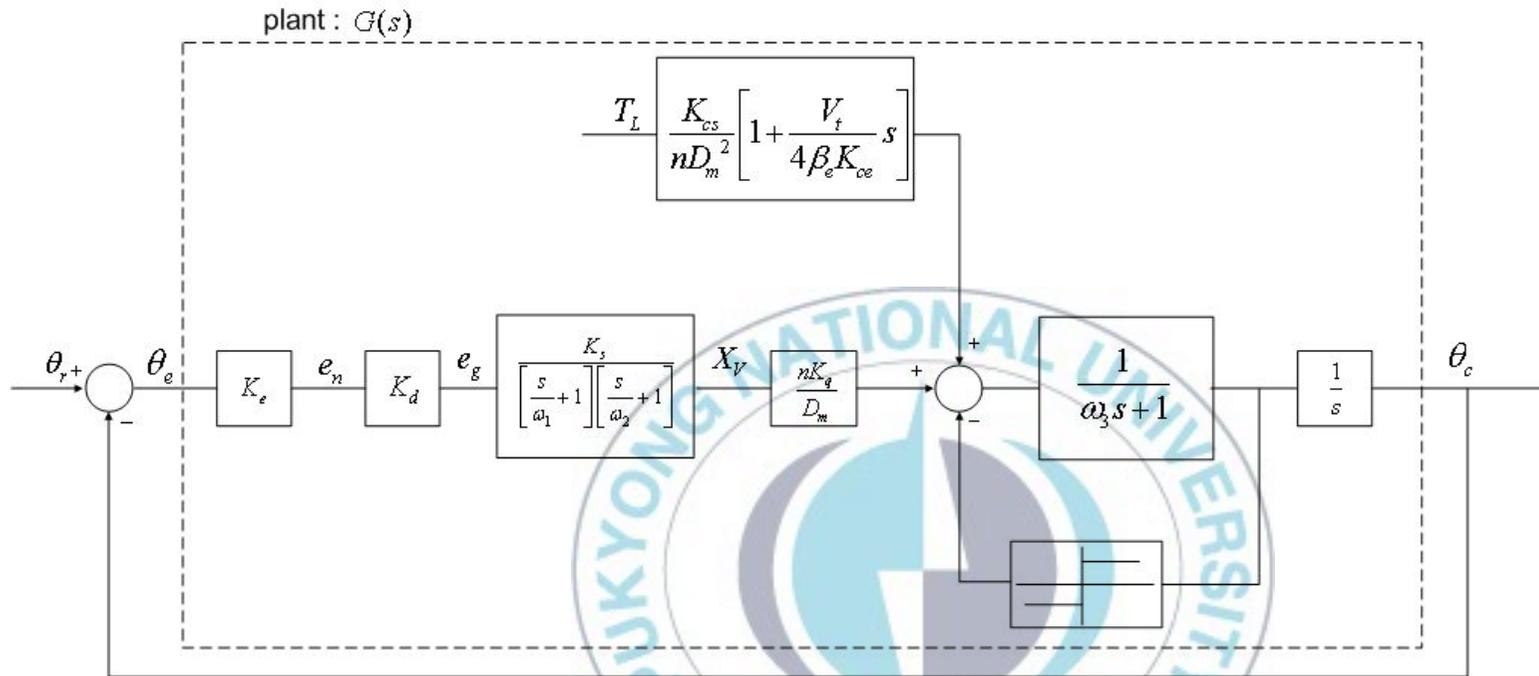


그림 6 전기유압 위치제어 서보플랜트의 블록선도
 Fig. 6 Block diagram of electrohydraulic position control servo

3.2 실시간 시스템 구현방법

비선형제어기를 실시간 시스템으로 구현하기 위해서 그림7과 같이 시스템 $G(s)$ 에 해당되는 시뮬레이터와 비선형제어기 $K(s)$ 인 디지털 컴퓨터가 필요하게 된다. 시뮬레이터는 아날로그 컴퓨터와 같은 시스템으로 실시간 시뮬레이션 수행시에 주로 적용 되지만, 실제 시스템에서 일어날 수 있는 불확실성을 아날로그 컴퓨터 시스템에서 재현시키기는 매우 어렵다.

따라서 본 시스템 구현에서는 실제시스템에 적용될 서보증폭기 및 서보모터 및 부하를 설계하여 시스템구현을 제시한다. 이때 부하 관성모멘트는 모터측에서 본 등가부하 관성 모멘트를 계산하여 Dummy부하를 설계하고, 모터측에 직접 연결함으로써 고려되어졌으며, 설계된 Dummy부하장치는 관성모멘트를 조절할 수 있도록 설계한다.

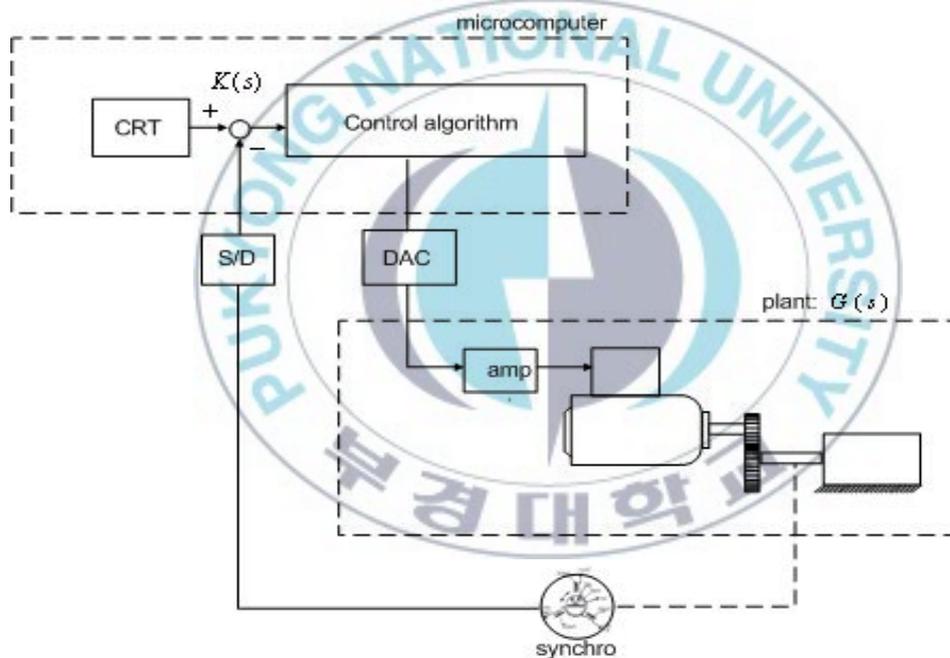


그림 7 실시간 디지털 서보시스템의 구성도

Fig.7 Schematic of real time digital servo system

3.3 시뮬레이션 및 고찰

식 (28), 식 (29)에서 구한 최적의 필터계인행렬에 대하여 시뮬레이션을 수행 하였다. 그림 8은 목표필터루프의 특이값 선도를 나타내고, 설계사양 2)의 교차주파수 50 rad/sec를 만족함을 알 수 있다.

그림 9은 선형제어기에 대하여 비선형시스템에 대한 개루프특이값선도, 폐루프특이값선도를 각각 나타낸다. 여기에서 랜덤명령입력이 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} 인 경우 목표 필터루프에 완전히 회복되지 않으므로 주파수역 특성이 만족스럽지 않음을 예측할 수 있다.

각각의 선도에서 R의 변화에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 각각의 선도에서 1 ; 10^{-1} , 2 ; 10^{-2} , 3 ; 10^{-3} , 4 ; 10^{-4} , 5 ; 10^{-5} , 6 ; 10^{-7} , 의 R값에 결과를 나타낸다.

그림 11은 단위명령입력을 0.5° , 1° , 5° , 10° , 50° 로 변환시킨 경우 표준화된 (출력값=1.0) 응답곡선을 나타낸다. 선형제어기의 경우 입력값이 크면 설계사양을 만족 할 수 있으나 5° 이하인 경우 설계사양 1). 을 만족하지 않음을 알 수 있다.

그림 12, 그림 13는 비선형시스템에 대하여 콜롱마찰력을 고려한 비선형제어기의 개루프특이값선도, 폐루프특이값선도를 각각 나타낸다. 그림 12에서 저주파영역에서 특이값이 낮으므로 설계사양 3). 을 만족함을 알 수 있고 그림 13에서 설계사양 4). 를 만족함을 알 수 있다. 여기에서 명령입력의 잡음강도의 변화에 대하여 양호한 주파수역 특성을 나타내고 설계사양을 만족함을 예측할 수 있다.

그림 14은 비선형제어시스템의 단위명령입력에 대한 표준화된 응답곡선을 나타내고, 선형제어기에서 발생되었던 정상상태 오차는 발생되지 않음을 알 수 있다.

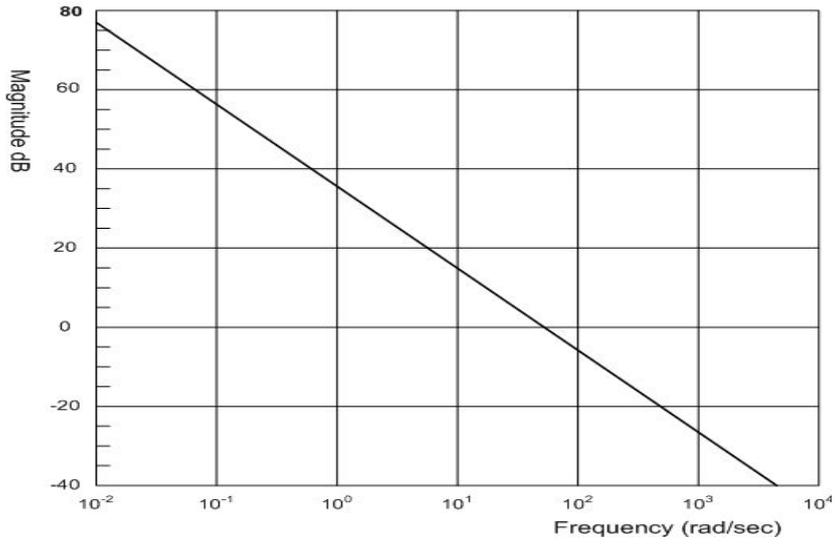


그림 8 목표필터루프의 특이값선도
 Fig. 8 Singular value of target filter loop

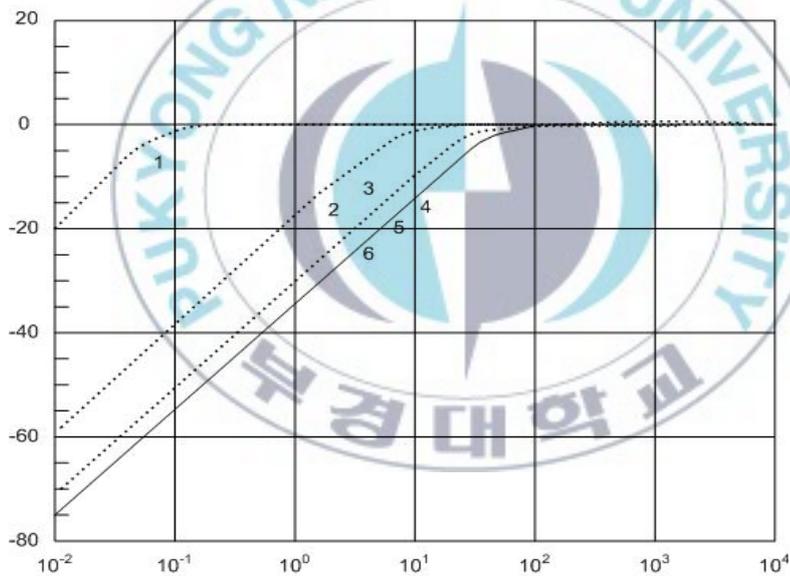


그림 9 비선형플랜트에 대한 선형제어기의 개루프특이값선도
 Fig. 9 Open loop singular value plot of linear controller about nonlinear plant

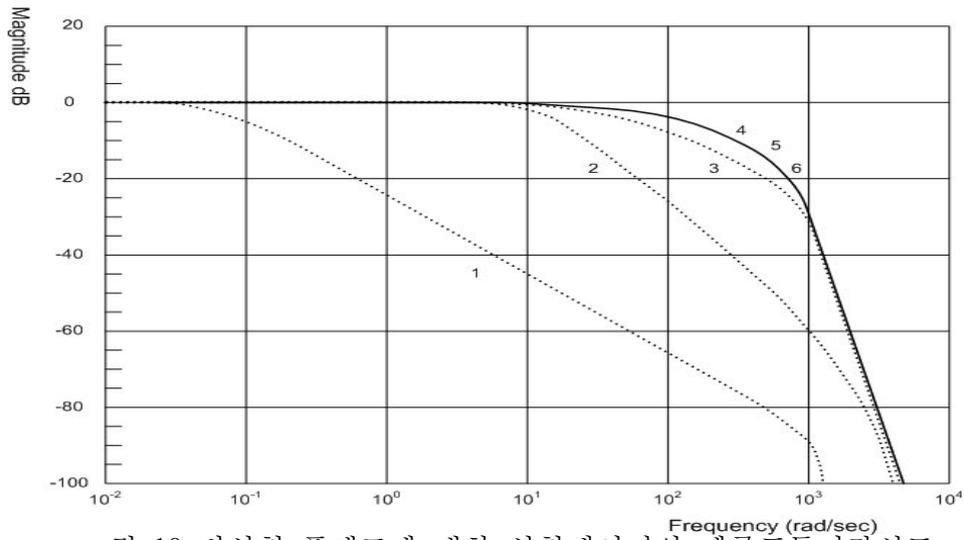


그림 10 비선형 플랜트에 대한 선형제어기의 폐루프특이값선도

Fig. 10 Closed loop singular value plot of linear controller about nonlinear plant

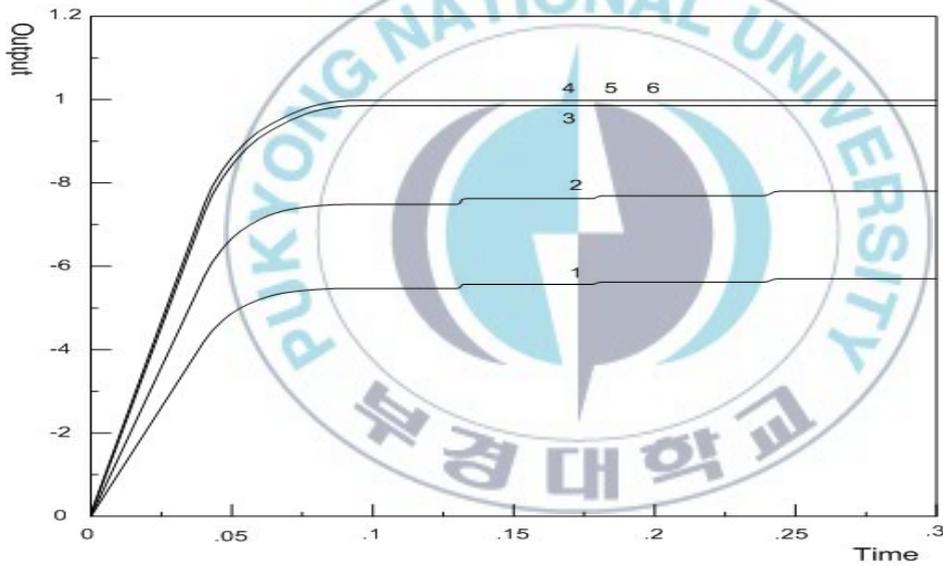


그림 11 비선형 플랜트에 대한 선형제어기의 표준화된 단위응답

Fig. 11 Normalized unit step response of linear controller about nonlinear plant

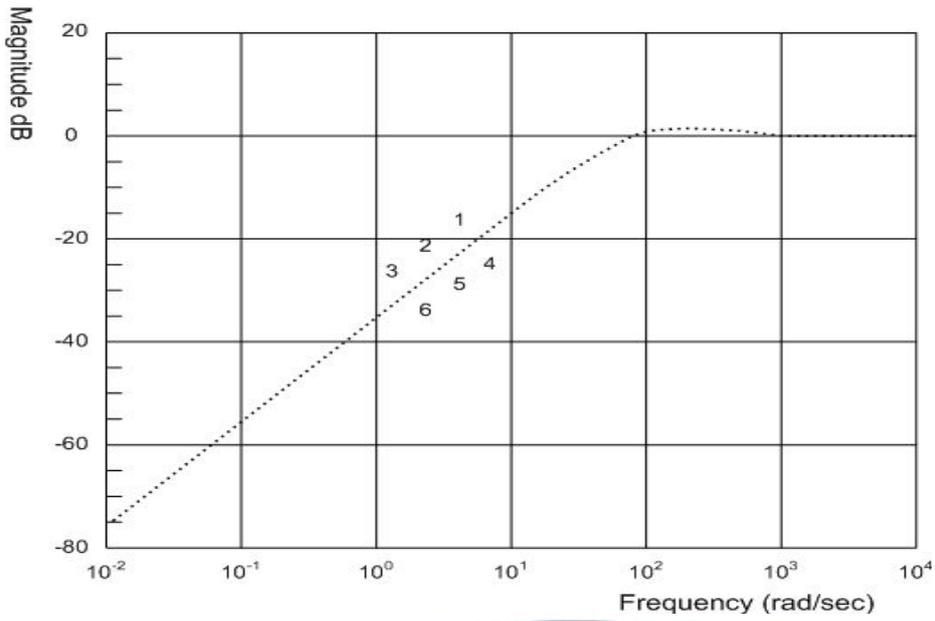


그림 12 비선형플랜트에 대한 비선형제어기의 개루프 특이값선도
 Fig. 12 Open loop singular value plot of nonlinear control system

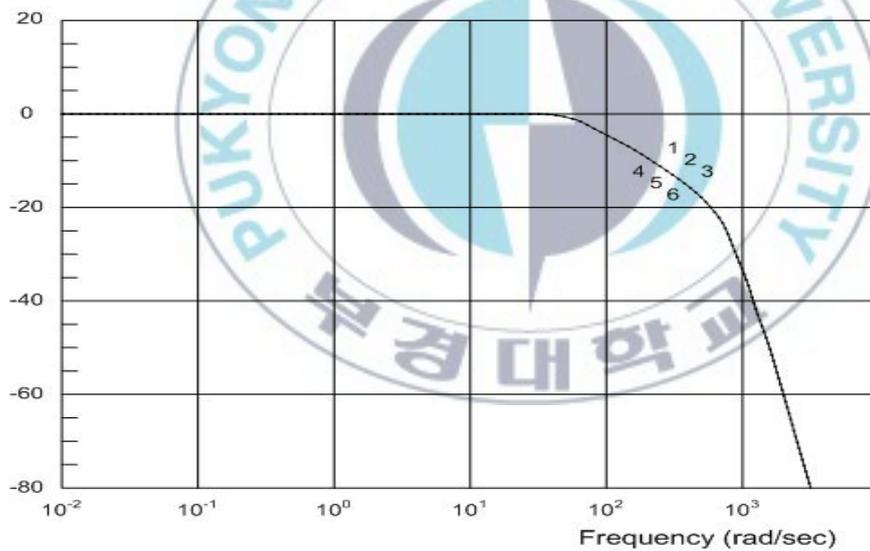


그림 13 비선형플랜트에 대한 비선형제어기의 폐루프 특이선도
 Fig. 13 Closed loop singular value plot of nonlinear control system

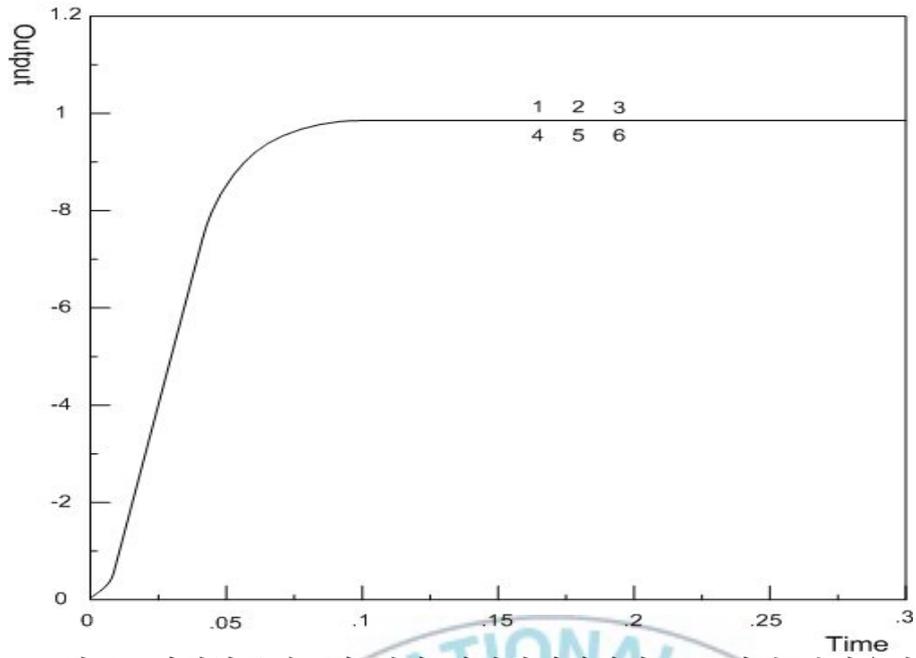


그림 14 비선형플랜트에 대한 비선형제어기의 표준화된 단위응답

Fig. 14 Normalized unit step response of nonlinear control system



제 4 장 결 론

본 논문에서는 기동중 사격, 큰 동특성등으로 인하여 외란의 영향이 크고, 모델화 되지 않은 항(센서 동역학, 굽힘 및 비틀림 모드등)을 많이 내포하고 쿨롱마찰력이 지배적인 터렛 서보시스템의 제어기 설계를 위하여 3차계의 비선형근사모델인 터렛 서보시스템에 대하여 확률선형화이론을 적용하여 설계사양을 만족하는 비선형 LQG/LTR제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통하여 제어성능을 분석하였다.

시뮬레이션결과 확률선형모델에 대하여 선형제어기인 LQG/LTR제어기는 작은 명령입력에 대하여 목표필터루프에 회복되지 않고 설계사양을 만족하지 않으나 본 논문에서 제시된 비선형제어기는 명령입력의 크기에 관계없이 목표필터루프에 잘 회복 되었으며 선형제어기에서 발생되었던 정상상태 오차가 발생되지 않았다.



참고 문헌

- [1] M. G. Safonov, "Stability and Robustness of Multivariable Feedback systems" Cambridge, M.I.T. Press 1980
- [2] J.C.Doyle and G.Stein "Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical/Modern Synthesis," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-26, pp. 4-16, Feb. 1981
- [3] N.A.Lehtomaki, N.R.Sandell, Jr., and M.Athans, "Robustness Results in Linear Quadratic Gaussian Based Multivariable Control Design," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-26, pp. 75-92, Feb. 1981
- [4] G.Stein and M.Athans, "The LQG/LTR Procedure for the Multivariable Feedback Control Design," IEEE Trans. Automatic Control, vol. AC-32, pp.105-114, Feb. 1987
- [5] U.Shaked, "Guaranteed Stability Margins for the Discrete time Linear Quadratic Optimal Regulator." IEEE Trans. Automatic Control, vol. AC-31 pp.162-165, Feb. 1986
- [6] J.S.Kim, "Nonlinear Mutivariable Control Using Statistical Linearization and Loop Transfer Recovery," Ph.D Dissertation, M.I.T. , Jan. 1987
- [7] 임판호, "부하외란을 받는 편로.드 유압실린더의 위치제어에 관한 연구", 경남대학교 석사학위논문, 2002.
- [8] 윤일로, "적응제어기를 이용한 전기유압 서보계의 제어특성 개선에 관한 연구", 경남대학교 박사학위논문, 2000.

감사의 글

바쁘신 중에도 항상 애정으로 저를 지도해주신 배종일 교수님과 심사에 수고해주신 권성렬 교수님, 박한석 교수님께도 감사드립니다. 공부하는 2년여의 과정에서 많은 기쁨과 에너지를 얻었고 뭐든 하면 할수록 배워야 할 것이 많다는 것을 알았습니다.

2년이라는 시간동안 함께 동고동락한 동기들과 학과 식구들께 감사드리며, 연구실에서 같이 고민하고 연구하며 많은 도움을 준 남협진, 차준승 후배에겐 정말 고마움과 미안한 마음을 전합니다. 또한 순간순간 제가 갈피를 잡지 못할 때 큰 응원이 돼 주었던 존경하는 정채원님 에게도 진심어린 감사 인사를 드립니다. 그리고 다소 뒤늦은 공부를 시작하는 저를 언제나 앞서 걱정하고 기뻐하며 지지와 격려를 아끼지 않았던 부모님께 글로 다 할 수 없는 마음을 전합니다.

부족함이 많은 논문이지만 이 작은 결실이 그 동안 저를 아껴주신 모든 분들의 은혜에 조금이나마 보답이 되기를 기원하며 모든 일에 도전하며 열심히 노력하는 계기가 되도록 하겠습니다.

2010년 12월
심 창 수