

수중운동체의 심도제어를 위한 제어기 설계

이만형, 박경철*, 곽한우

부산대 제어기계공학과, 부산대 대학원*, ** 국방과학연구소

Controller Design for Depth Control of Vehicle under Seawater

M.H. Lee, K.C. Pak*, H.W. Kwak

*Department of Control and Mechanical Engineering, Pusan National University
ADD

ABSTRACT

In order to hold a underwater vehicle at a certain depth, we can modulate buoyancy that acts on the underwater vehicle. In this research, by using a balloon, we was able to generate buoyancy that could control depth in which vehicle was operated. And in order to control flux of air that was flowed in balloon, we used solenoid valve, relief valve and so on. We derived differential equations of volume of balloon, pressure of inside of balloon, dynamic of underwater vehicle, and air flux for the simulation and linearized these differential equation. So we designed LQG/LTR controller, and applied the controller to nonlinear system. Through the simulation, we compares the nonlinear system with the linear systme and investigated the operation of solenoid valve.

비선형 방정식을 작동점에 대해 선형화 하고 LQG/LTR 제어기를 설계되었으며, 설계된 제어기를 선형 시스템과 비선형 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 이 때 비선형 시스템의 경우 PWM 방식에 의한 솔레노이드 밸브의 작동으로 공기 유량을 제어하였다.

II. 수중운동체의 심도 제어를 위한 모델

심도제어를 위한 개념도는 그림.1과 같다. 그림에서와 같이 외부 센서에 의해 수심을 알 수 있으며, 제어기에서 기준입력과 오차에 대해 유입밸브와 유출밸브에 신호가 주어지게 된다. 부유백이 일정 부피가 되어 수중운동체가 상승하여 심도가 바뀌면 주변 수압이 작아져 부유백이 커지고 상승속도가 빨라지므로 부유백의 부피를 일정하게 유지시키기 위해 일정 압력차에서 작동하는 안전밸브(relief valve)를 사용하여 공기를 배출 시킨다.

I. 서 론

일반적으로 수중운동체의 수심조절 방법에는 부력조절형과 추력조절형이 있다. 부력조절형은 운동체가 대형인 경우 해수를 이용하여 중량을 조절하는 방법과 소형인 경우 부유백 등을 이용하여 부피를 조절하는 방법이 있고 추력 조절형은 주로 추진 프로펠러의 회전수 조절을 통하여 수심을 조절한다.

본 연구에서는 수중운동체의 심도제어를 위해 부유백 방식을 이용한 부력조절장치를 사용하였으며, 솔레노이드 밸브를 사용하여 부유백에 공기를 공급 또는 배출하여 부력을 조절하여 수중운동체의 심도제어를 하였다. 이 때, 솔레노이드 밸브는 PWM방식에 의해 작동되며 PWM신호는 제어기의 출력에 의해 결정되도록 하였다. 또한 심도제어를 위한 제어기를 설계하기 위해 제어입력, 즉 공기의 유량을 입력으로 하는 부유백의 압력 및 부피의 변화율을 유도하였으며, 부유백의 부피 변화에 따른 수중운동체의 운동방정식을 유도하였다. 그리고 유도된

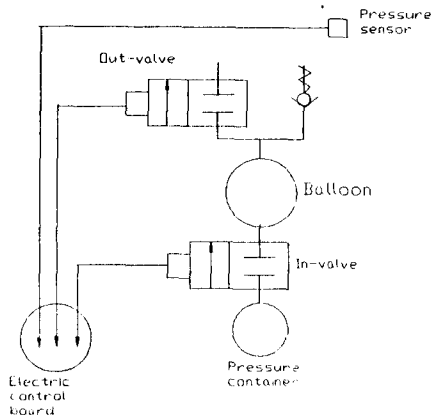


그림. 1 수중운동체의 모델

부유백의 부피가 중성부력 이상이면 수중운동체는 상승하려고 하게 되며 부유백이 하강하기 위해서는 부피가 중성부력보

다는 작아야 한다. 부유백이 중성부력 보다 작아지기 위해서는 부유백의 인장력에 의해 내부의 공기가 배출 되어야 하며, 따라서 제어가 가능한 부유백의 크기는 중성부력 보다 약간 작아야 한다. 수중운동체의 질량을 m , 질량 가속도를 g , 수중운동체의 부피를 V_d , ρ 는 해수의 밀도, 부유백의 부피를 V_b 로 두면 수중운동체의 중성부력은 다음과 같은 방법으로 결정한다.

$$mg = \rho g(V_b + V_d)$$

이 때 중성 부력은 $V_b = \frac{m}{\rho} - V_d$ 이다.

III. 시스템 모델링

1. 운동 방정식

수중운동체의 운동을 수직 방향으로만 고려할 때에 항력과 부유백의 부피에 의한 부력에 대하여 수중운동체의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.¹⁵⁾

$$\ddot{h} = a\dot{h}^2 + bV_b + c$$

$$a = -\frac{C_d \rho A_d}{2m^2}, \quad b = \frac{\rho g}{m}, \quad c = -g + \frac{\rho g}{m} V_d$$

여기서, C_d 는 항력계수이며, A_d 는 수중운동체의 운동방향에서 해수와 만나는 부분의 면적, V_d 는 수중운동체의 부피, V_b 는 부유백의 부피이다.

수심 \bar{h} 를 평형점으로 하였을 때, 부유백의 부피가 \bar{V}_b \bar{h} 를 f 라고 하면 이 시스템은 다음과 같이 선형화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{h}_2 &= a\dot{h}_2^2 + b\bar{V}_b + c \\ &+ \frac{\partial f}{\partial \dot{h}_2} \Big|_{\bar{h}_2, \bar{V}_b} (\dot{h}_2 - \dot{\bar{h}}_2) + \frac{\partial f}{\partial V_b} \Big|_{\bar{h}_2, \bar{V}_b} (V_b - \bar{V}_b) \\ &= 2a\bar{h}_2\dot{h}_2 + bV_b - a\dot{\bar{h}}_2^2 + c \end{aligned}$$

여기서 $h_1 = h$, $h_2 = \dot{h}_1$, $h_3 = \dot{h}_2$ 이고, \bar{h}_2 는 평형점에서의 속도이다. 상수 항을 없애기 위해서 위식을 미분하면, 다음과 같이 된다.

$$\ddot{h}_3 = 2a\bar{h}_2\dot{h}_3 + bV_b \quad (1)$$

따라서 이식에서 알 수 있듯이 심도의 변화는 부유백의 부피 변화에 관계됨을 알 수 있다. 부유백의 부피변화는 다음과 같다.

2. 부유백의 부피 변화

부유백을 구라고 가정할 때, 부유백 내부에 공급되는 공기의 질량 변화율에 의해서 부피와 압력이 동시에 변하게 된다. 따라서 질량변화율에 대한 부유백의 부피와 압력 변화율을 다음

의 두 식을 이용하여 연립으로 구할 수 있다.

먼저 이상기체 방정식을 이용하면 부유백의 부피와 압력의 관계는 다음과 같다.

$$P_b(t)V_b(t) = m_b(t)RT$$

이 때 P_b 는 부유백 내부의 압력이며, m_b 는 부유백내의 공기의 질량, R 은 기체 상수, T 는 공기의 온도 이다. P_b , V_b 는 공기의 질량 유량에 따라 동시에 변하므로, \bar{P}_b , \bar{V}_b 를 작동수심에서의 부유백의 부피와 압력으로 두고 선형화 하여 양변을 미분하면 다음과 같다.

$$V_b \bar{P}_b + \bar{V}_b \dot{P}_b = \dot{m}_b RT \quad (2)$$

또한 인장력을 받으며 팽창하고 있는 부유백의 부피는 다음과 같이 구할 수 있다.¹²⁾

$$\begin{aligned} V_b &= V(1 + \alpha(P_b - P_h))^3 \\ \alpha &= \frac{R_{br}}{2E\epsilon_{br}}(1 - \nu) \end{aligned}$$

여기서, V 는 부유백의 초기 부피, E 는 고무의 인장강도 ϵ_{br} 은 고무의 두께, R_{br} 은 부유백의 반지름 이며, ν 는 프와송 비이다.

위 식을 선형화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_b &= V(1 + \alpha(\bar{P}_b - \bar{P}_h))^3 \\ &+ \frac{\partial V_b}{\partial P_b} \Big|_{\bar{P}_h, \bar{P}_b} (P_b - \bar{P}_b) + \frac{\partial V_b}{\partial P_h} \Big|_{\bar{P}_h, \bar{P}_b} (P_h - \bar{P}_h) \\ &= V(1 + \alpha(\bar{P}_b - \bar{P}_h))^3 + 3V(1 + \alpha(\bar{P}_b - \bar{P}_h))^2 \alpha (P_b - \bar{P}_b) \\ &\quad - 3V(1 + \alpha(\bar{P}_b - \bar{P}_h))^2 \alpha (P_h - \bar{P}_h) \end{aligned}$$

부유백의 부피 변화율을 구하기 위해 위 식을 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_b = \beta \dot{P}_b - \beta \dot{P}_h \quad (3)$$

$$\beta = 3V(1 + \alpha(\bar{P}_b - \bar{P}_h))^2 \alpha$$

(3)식을 (2)식에 대입하면 질량 변화율 $\dot{m}(t)$ 에 대한 \dot{P}_b 를 구할 수 있다.

$$\dot{P}_b = \alpha_1 \dot{P}_h + \alpha_2 \dot{m}(t)$$

$$\alpha_1 = \frac{\bar{P}_b \beta}{(P_b \beta + V_b)}, \quad \alpha_2 = \frac{RT}{(P_b \beta + V_b)}$$

수심 h 일 때의 압력은 P_h 를 대기압, ρ 를 해수 밀도로 둘 때, 다음과 같다.

$$P_h(t) = P_a - \rho gh(t)$$

위 식의 양변을 미분하면, 수심의 변화에 따른 압력의 변화는 $\dot{P}_h = -\rho gh$ 이다. 따라서 부유백 내의 압력의 변화는 \dot{h} 와 질량 변화율 $\dot{m}(t)$ 로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{P}_b = -a_1 \rho gh + a_2 \dot{m}(t)$$

다시 위 식을 (3)식에 대입하여 부유백의 부피 변화율 \dot{V}_b 를 구할 수 있다.

$$\dot{V}_b = -\beta_1 \rho gh + \beta_2 \dot{m}(t) \quad (4)$$

$$\beta_1 = (\beta a_1 - \beta), \quad \beta_2 = \beta a_2$$

(4)식을 이용하면 수중운동체의 운동방정식 (1)은 공기의 질량 유량 $\dot{m}(t)$ 을 제어입력 u 로 두었을 때, 다음과 같은 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{h}_1 &= h_2 \\ \dot{h}_2 &= h_3 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dot{h}_3 = -b\beta_1 \rho gh_2 + 2a\overline{h_2}h_3 + b\beta_2 u$$

3. 공기압 밸브의 질량 유량

(5)식에서 제어입력 u 는 부유백에 공급되는 압축공기의 질량유량이다. 따라서 솔레노이드 밸브를 통하여 유입·유출되는 공기의 질량 유량을 정확히 알아야 한다.

공기는 압축성이므로 압력차를 크게 해도 유속이 음속을 초과할 수 없으며, 유량은 음속일 때 최대가 된다. 축류부의 유속이 음속을 초과하지 않을 때 질량 유량은 다음과 같다.^[3]

$$\dot{m}(t) = A \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}} \frac{P_H}{\sqrt{T_H}} \left(\frac{P_L}{P_H} \right)^{1/k} \sqrt{1 - \left(\frac{P_L}{P_H} \right)^{(k-1)/k}}$$

여기서, P_H 는 상류 측의 압력, P_L 는 하류 측의 압력이다.

밸브를 통과하는 공기의 유속은 밸브의 압력차에 따라 커지거나 하류와 상류의 압력비가 0.528일 때 음속이 된다. 이때 질량 유량은 최대가 되며 다음과 같다.

$P_L/P_H = 0.528$ 일 때,

$$\dot{m}(t) = A \frac{P_H}{\sqrt{T_H}} \sqrt{\frac{k}{R \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}$$

IV. LQG/LTR 제이기 설계

LQG/LTR 방법을 이용한 제어시스템의 설계에서 필터계인행렬 H 는 목표필터를 설계할 때, 제어계인행렬 G 는 루프전달회

복 절차를 수행하여 선정한다.

목표 필터를 설계하기 위하여 프로세서와 센서에 가상적인 백색잡음을 고려한 설계 플랜트의 상태공간식은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + L\xi(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + \eta(t)$$

$\xi(t)$: 프로세서 백색잡음, $\eta(t)$: 센서 백색잡음

이 때, (5)식에서 작동점을 수심 100m로 하면, A, B, C는 다음과 같다.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.096 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 44.6 \end{pmatrix}, \quad C = (1 \ 0 \ 0)$$

이 식은 안정가능하고 검출가능하며 입력 u 와 출력 h 에 대한 전달함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{h(s)}{u(s)} = \frac{44.61}{s(s^2 - 0.0957)}$$

Kalman 필터 설계방법을 이용하여 필터계인행렬 H 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H = \frac{1}{\mu} PC^T$$

이때, 행렬 P 는 다음의 필터대수식(Filter Algebra Riccati Equation)으로부터 구한다.

$$AP + PA^T + LL^T - \frac{1}{\mu} PC^T CP = 0$$

여기서 행렬 L 과 μ 는 설계 파라미터로서 L 은 바람직한 루프형상이 되도록 선정하고 μ 는 요구되는 대역폭 혹은 교차주파수를 만족하도록 선정한다. L 을 선정하기 위해서는 시스템에 자유적분 요소가 포함되어야 하며, 선형화된 수중운동체의 경우 적분요소가 포함되어 있으므로 자유적분요소를 다시 첨가하지 않았다. 일반적으로 단일 입력력 시스템에 대한 최적 루프 형성은 자유적분요소만 남겨놓고 플랜트의 모든 극점이 제거되도록 행렬 L 을 선정하여 바람직한 루프 형상을 만들 수 있으며, 설계된 루프 형상에 대해 μ 값을 이용하여 대역폭을 조절할 수 있다.

수중운동체는 수중에서 부유백의 부력을 이용하여 제어되어야 하므로 시스템 자체가 매우 느리고 부유백에 유입 혹은 유출되는 압축공기의 질량유량 또한 매우 작아 제어입력이 제한되어진다. 따라서 목표 필터루프의 대역폭을 작게 잡아 응답 속도가 느리게 하였다. 설계된 목표필터루프의 Bode선도는 그림. 3와 같다.

설계된 목표필터투프에 대해 루프전달회복을 시도하기 위해 제어대수 Riccati식의 해를 이용하여 제어게인행렬 G를 선정할 수 있다. LTR 절차를 거쳐 설계된 보상기 K(s)는 다음과 같으며 회복된 루프전달함수 K(s)G(s)의 Bode선도는 그림. 4과 같다.

$$K(s) = \frac{8966s^2 + 3962s + 446.1}{s^3 + 153.7s^2 + 11813s + 456500}$$

보상기가 첨가된 시스템의 폐루프 전달함수와 감도 전달함수의 Bode선도는 그림. 5와 같으며 약 1 rad/sec 정도의 대역폭을 가진다.

V. 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 개요

설계된 LQG/LTR 제어를 선형화된 시스템과 실제의 비선형 시스템에 적용하고 비교하였다. 초기치는 수중운동체의 수심으로 주어지며 부유백의 초기부피는 부유백이 인장력을 받기 시작하는 4 t로 하였다. 솔레노이드 밸브의 작동은 PWM (Pulse Width Modulation) 방식에 의해 제어되며 PWM 신호는 제어기의 출력으로 결정된다. 안전밸브는 부유백의 내부와 외부의 압력차에 의해 작동하게 되고 유입밸브는 하강할 때만 작동하도록 하였으며, 상승할 때는 안전밸브의 작동으로 일정량의 공기가 배출되면서 상승 속도와 부유백의 부피는 일정하게 유지된다.

측정 잡음을 고려하여 압력센서의 측정간도를 약 1m로 두고 백색잡음을 외란으로 하여 시뮬레이션을 하였다.

2. PWM(Pulse Width Modulation)

제어 입력, 즉 부유백에 유입, 유출되는 공기의 질량유량은 비선형 시스템의 경우, 솔레노이드 밸브의 작동에 의해 주어지게 되며 밸브의 작동은 PWM 방식으로 제어가 된다.

PWM은 그림. 2와 같이 일정한 샘플링 간격 t_s 에 대한 밸브의 작동시간 t_p 를 결정하고 ON/OFF방식으로 밸브를 제어하게 된다. 따라서 일정한 샘플링 시간에 공급되는 제어입력은 솔레노이드 밸브를 지나는 공기의 유량의 크기에 각 밸브가 열려 있는 시간을 곱한 것으로 생각할 수 있을 것이다.

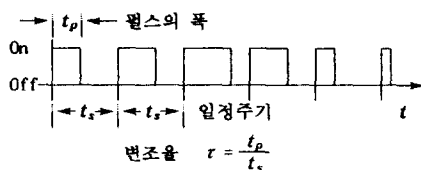


그림. 2 PWM 신호

여기서는 샘플링 시간마다 각 밸브가 열려 있는 시간을 결정하기 위해 샘플링 순간의 제어입력의 크기에 샘플링 간격을 곱하여 샘플링 시간동안 공급되어야 하는 제어유량을 계산하고 그 순간의 유입 혹은 유출밸브의 유량으로 나누어 밸브의 On time 을 결정하였다.

3. 시뮬레이션 결과

수심 110m를 초기 위치로 두고 100m의 기준 입력을 주었을 때, 선형 시스템과 비선형 시스템의 응답은 그림. 6과 같다. 그림과 같이 선형 시스템과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, 비선형 시스템의 경우 정상상태에 도달해서 외란 등의 영향과 연속적인 부유백부피의 변화로 작은 진폭으로 오실레이션 하는 것을 볼 수 있다.

제어 입력은 그림. 7과 같이 나타 나며, 역시 선형 시스템과 비선형 시스템이 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그림. 8은 비선형 시스템의 제어입력이 실제 부유백에 유입, 유출되는 공기의 질량 유량으로 나타나는 것을 보인 것으로 솔레노이드 밸브에 의해 유출입되는 공기의 질량 유량을 보여준다. 여기서 초기에 정상상태에 도달하기 까지 공기가 배출되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 안전밸브에 의한 것이다. 여기서 공기의 유입 또는 유출이 실제 보다는 작게 나타나는데 이것은 출력 데이터의 수를 줄이기 위해 모든 데이터가 나타나지 않은 이유 때문이다. 실제 유량의 변화는 그림. 9에서와 같이 나타난다.

그림. 9는 50~60초까지의 부유백 내부의 공기 유량 변화를로서 유입밸브의 유량은 압력 용기에서 공급되므로 용기 내부와 부유백내의 압력차가 커서 크기가 매우 크며 거의 일정한 것을 알 수 있으며, 유출밸브의 경우 음수 값을 가지는 것으로 크기가 변하는 것을 볼 수 있는데 이것은 부유백 내부와 외부의 압력차에 영향을 받으므로 부유백의 크기와 수중운동체의 위치에 따라 계속변하며 유입밸브에 비해 크기는 작지만 많은 시간동안 열려 있는 것을 그림. 10을 통해 알 수 있다.

그림. 11은 기준 입력을 95m, 100m, 105m로 하였을 때의 결과이다.

VI. 결 론

수중운동체의 수심을 제어하기 위하여 부력을 사용하였으며, 부유백의 부피변화와 내부의 압력변화 등을 선형화하여 부유백에 공급되는 공기유량을 제어입력으로 하는 수중운동체의 상태 방정식을 유도하였다. 수중운동체는 부유백 등을 모델링할 때 많은 모델링 오차가 있을 것으로 예상되며 수중에서는 해파 등의 영향으로 외란의 영향 또한 무시할 수 없다. 따라서 모델링 오차와 외란 등에 강인한 선형 LQG/LTR 제어를 설계하고 다시 비선형 시스템에 적용하여 시뮬레이션 하여 선형 시스템

과 비선형 시스템에서의 결과를 비교하였다.

이 때, 비선형 시스템에서는 PWM방법으로 솔레노이드 밸브를 사용하여 부유백에 유출입되는 공기유량을 제어하였으며 시뮬레이션 결과, 선형 시스템에서의 거의 비슷한 결과를 가져왔고 외란의 영향에도 만족 할만한 결과를 가져왔다. 하지만 제어입력의 제한으로 빠른 응답속도를 기대할 수 없으며, 응답속도를 개선하기 위한 연구가 계속되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] Franklin D. Yeaople 1966 "Hydraulic and pneumatic power and control," McGraw-Hill, New York, pp. 34~40, pp. 89~111.
- [2] A. C. Ugural, 1981 "Stresses in Plates and Shells," McGraw-Hill, pp. 205
- [3] 黃世後, 1989, "油空壓의 디지털制御와 應用," 機電研究社,
- [4] 이창돈, 1991, "고속 전자밸브를 이용한 차동 PWM에 의한 유압실린더의 위치제어에 관한 연구," pp. 4~15.
- [5] 이만형, 손권, 탁대원, 권순홍, 1992, "화학가스식에 의한 기반기 동특성 해석 기법연구," 국방과학연구소 보고서
- [6] 박경철, 이만형, 락한우, 1993, "수중에서 운동하는 물체의 수심제어," 대한 기계학회 춘계학술대회 논문집
- [7] 김종식, 1991, "선형 제어시스템 공학," 청문각
- [8] John C. Doyle, B. A. Francis, A. R. Tannenbaum, 1992, "Feedback Control Theory," Maxwell Macmillan
- [9] Donald E. Kirk, 1970, "Optimal Control Theory an Introduction," Prentice Hall

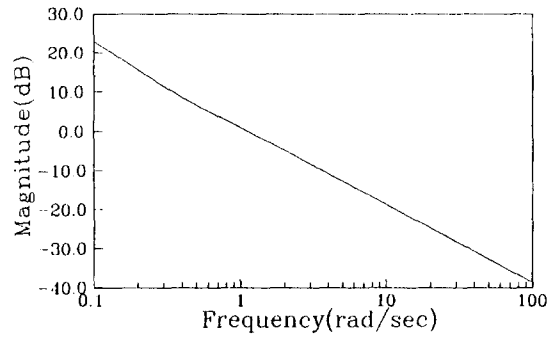


그림. 3 목표 필터 루프의 Bode 선도

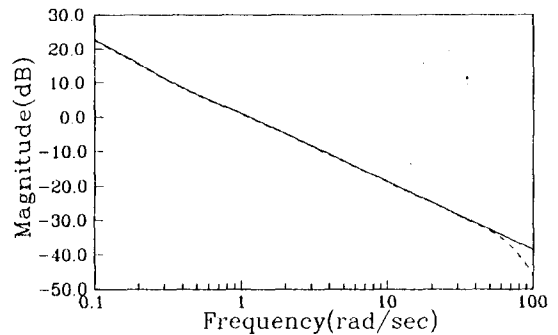


그림. 4 목표 필터 루프와 루프 전달함수 회복

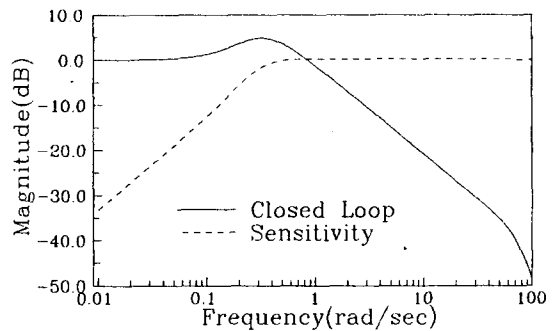


그림. 5 폐루프 전달함수와 감도 전달함수의 Bode 선도

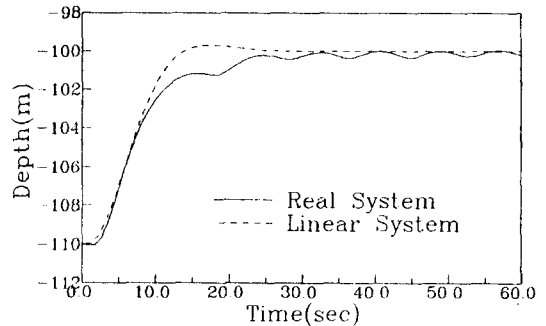


그림. 6 선형 시스템과 비선형 시스템에서의 응답

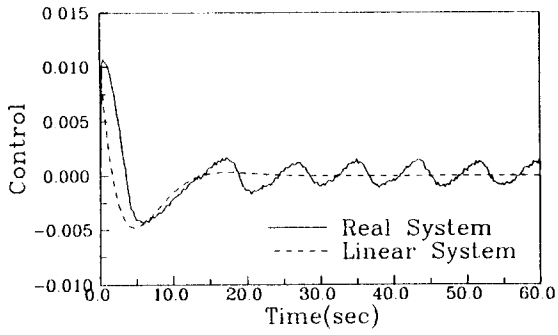


그림. 7 선형 시스템과 비선형 시스템에서의 제어입력

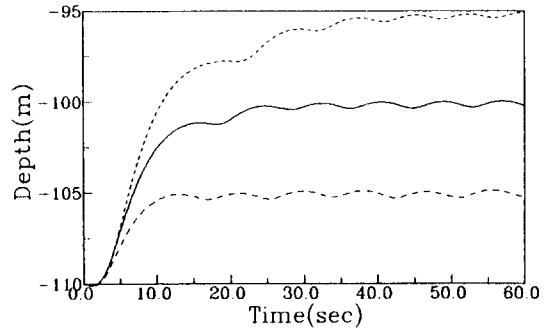


그림. 11 기준입력에 따른 비선형 시스템의 응답

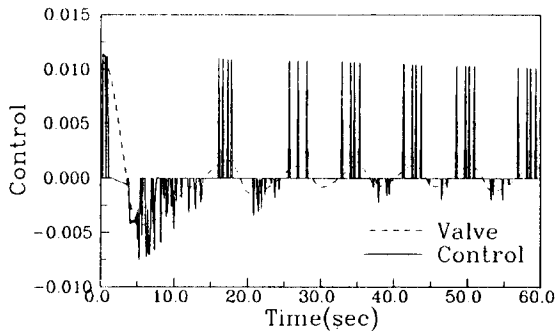


그림. 8 제어입력과 솔레노이드 밸브를 통한 유량 변화

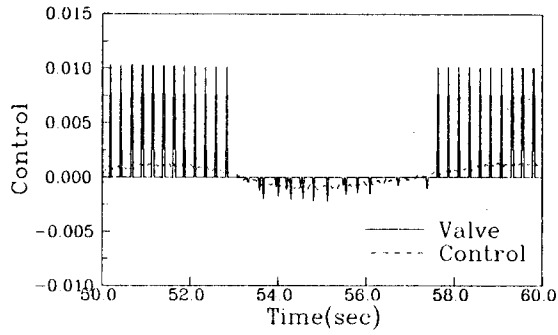


그림. 9 50~60 초에서의 제어입력과 유량변화

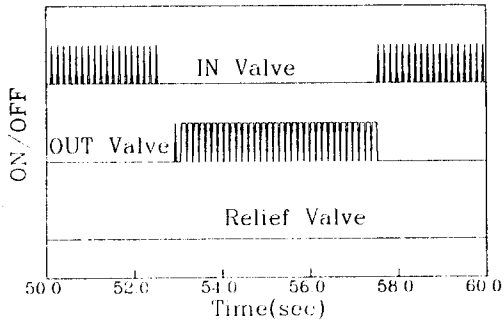


그림. 10 솔레노이드 밸브의 작동