

비례전자 감압밸브의 모델링과 제어 A Modeling of Proportional Pressure Control Valve and its Control

양 경 욱 · 이 일 영
K. U. Yang and I. Y. Lee

Key Words : Bond Graph(본드선도), Predictive Controller(예견 제어기), Hydraulic Servo System(유압 서보 시스템), Proportional Control Valve(비례 전자 밸브)

Abstract : In this study, a dynamic model of proportional pressure control valve using the bond graph and a predictive controller are presented in the form of dynamic matrix control which is concerned with a design method of digital controller for the electro hydraulic servo system. The bond graph can be utilized for all types of systems which involve power and energy, and it is applied to a propotional pressure control valve in this study. Recently, many researchers suggested that better control performance could be obtained by means of the predictive controls with future reference input, future control output and future control error. The Predictive controller is very practical because the controller can be easily applicable to a personal computer or a microprocessor. This study investigates through numerical simulations that hydraulic system with the predictive controller shows very good control performances.

1. 서 론

시스템을 해석하고 설계하기 위하여 우선 수행할 일은 제어할 동적 시스템을 수학적으로 표현하는 모델링 작업이다. 모델링 작업은 주어진 제어 대상의 동특성을 나타낼 수 있는 변수들을 선정하고 이 변수들이 다양한 형태의 방정식으로 표시되는 물리법칙을 통하여 변수들 사이의 상호관계를 찾는 것이다. 특히, 본드선도를 이용한 모델링 기법은 에너지 보존 법칙을 기본으로 시스템에 주어지는 동력의 흐름에 주목하여 시스템을 모델링하는 방법으로, 전기 시스템, 유체 시스템, 기계 시스템 등이 혼합된 시스템을 모델링하는데 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 모델링 결과가 상태 방정식으로 나타내기 때문에 컴퓨터 시뮬레이션으로 적용하기가 편리하다¹⁾ 본 연구에서는 비례전자 감압밸브를 본드선도를 이용하여 모델링하였다.

한편, 일반적으로 사용되고 있는 PID 제어기나

최적 제어기 등은 현재 시점 또는 과거 시점에서의 제어 오차 및 상태량 등을 기초로 한 제어기들이다. 이러한 제어기들은 미래의 제어 대상 파라미터의 불확실성들을 고려하지 못하기 때문에 외란 등의 영향으로 인한 제어 대상의 급격한 변화에 능동적으로 대처하기에는 상당한 제약을 가지고 있다. 이러한 제약에 대처하는 방법으로 상태 예측기와 외란 관측기 등을 이용하는 제어 알고리즘이 개발되고 있어 있지만, 이러한 방법들은 제어기 구조를 복잡하게 만들 뿐만 아니라 추종 속도나 정도에 한계가 있어 일반 산업 현장에서는 쉽게 적용시키기가 어렵다.

이러한 점들을 감안하여, 미래의 제어 대상 변화 등을 예측하여 제어 입력 자체를 직접 수정하는 예견 제어가 주목된다.²⁾

예견 제어는 미래의 기준 입력과 제어 대상의 동특성 모델을 이용하여, 미래의 제어 오차나 제어 출력을 예측하고 여기에서 얻어진 편차가 최소가 되도록 제어 입력을 결정하는 제어기이다. 따라서 기준 입력과 제어 출력의 급격한 변화에도 제어기가 이를 예측하여 원활한 제어 출력이 나오도록 제어 입력을 조정하게 된다.

Aida³⁾ 등은 예견 제어에 최적 제어 설계법을 도입한 방법을 사용하여 제어기를 설계하는 방법을

접수일 : 2002년 4월 11일
양경욱 : 여수대학교 동력시스템공학과
이일영 : 부경대학교 기계공학과

제시하였고 2차 형식의 평가 함수를 사용함으로써 안정한 제어를 구축할 수 있도록 하였지만 상태 변수를 추정하기 위한 관측기가 필요하여 제어기 자체가 복잡해지는 단점을 가지고 있다.

또한, Kitamori⁴⁾ 등은 기준 모델과 비교하여 제어 출력의 변화량을 기초로 제어기 계인을 구하는 예견 제어기 설계법을 제시하였으나, 제어 대상의 모델 정확도에 따라 예측치의 변화가 커진다.

동작을 반복하는 로봇, 시험기 등에도 예견 제어를 사용함으로써 안정한 제어 성능을 얻을 수 있다. 본 저자⁵⁾는 반복적으로 동작하는 유압 시스템에 사용 가능한 예견학습 제어기를 적용하여 원하는 제어 성능을 얻을 수 있었으나, 제어기 계인을 구함에 있어 어느 정도의 기억 용량이 필요하므로, 실제 산업 현장에서 구현할 때 어려움이 있었다.

따라서, 본 연구에서는 종래의 예견 제어에 사용되어진 2차 형식의 평가 함수를 간단히 하여 쉽게 제어기를 설계할 수 있는 기법을 제안하였다.

제한한 예견 제어기에서는 미래의 기준 입력과 제어 대상의 동특성 변화를 이용하여 미래의 기준 입력의 변화량과 기준 입력과 제어 출력 사이의 제어 오차를 최소화 하는 평가 함수를 이용하였다.

연구 수행은 제어 대상인 비례전자 감압밸브에 대하여 본드선도를 이용하여 모델링 하였으며, 제한한 예견 제어기의 유용성과 우수성을 수치 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

2. 유압 시스템의 개요

2.1 시스템의 개요

비례전자 감압밸브⁶⁾를 사용하여 비교적 작은 용량의 유압 실린더 내 압력 변화를 신속하게 제어 하는 기법을 확립하는 것이 본 연구의 목적이다.

본 연구에서 사용하는 비례전자 감압밸브는 내부에 부하압력 피드백 기구가 존재하기 때문에 제어 압력치에 맥동이 발생하기 쉽고, 비교적 긴 응답 시간 지연이 존재하여 신속한 제어를 수행할 때는 불안정해지기 쉬운 특징을 가지고 있다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 유압 서보 시스템에서 사용한 비례전자 감압밸브의 내부 구조도를 Fig. 1에 나타내었다.

본 시스템은 비례전자 압력 제어밸브와 이것을 조절할 제어기(컴퓨터), 유압 실린더, 유압 실린더 내 압력을 측정하기 위한 압력 센서로 이루어져 있다.

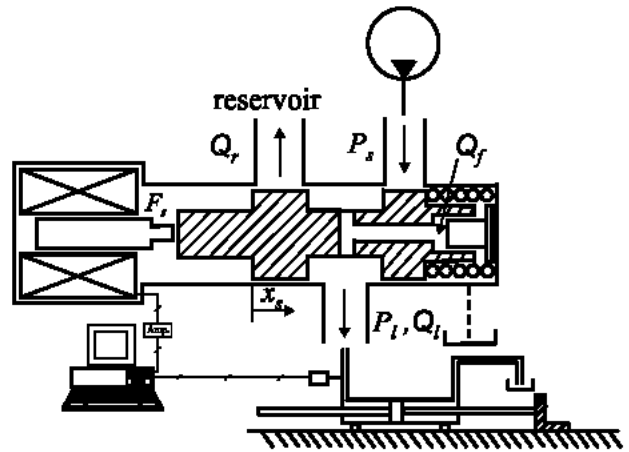


Fig. 1 Schematic diagram of the proportional pressure control valve

2.2 본드선도를 이용한 제어 대상의 모델링

본 연구에서 대상으로 하고 있는 유압 서보 시스템을 예견 제어기로 설계하기 위해서는, 우선 시스템의 수학적 모델링이 필요하다.

비례전자 감압밸브를 모델링함에 있어 다음의 가정을 두고 모델링하였다. 비례 전자 밸브의 부하측 포트에는 일정한 체적의 압력 용기(유압 실린더)가 연결되어 있으며, 밸브와 압력 용기 사이의 관 길이는 비교적 짧고 관로 단면적이 비교적 크며, 밸브 내부 손실 유량은 없는 것으로 간주한다. 또한, 밸브내 각 포트의 유량 계수는 일정하며, 밸브 내 스펴에 작용하는 유체력은 무시하였다.

일반적으로 밸브 내부를 흐르는 유량은 스펴의 움직임에 의하여 만들어진 오리피스 면적과 압력차에 의하여 결정되어지며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = f(C_d, A, \Delta P^{1/2}) \quad (1)$$

여기서, C_d 는 유량 계수, A 는 스펴의 개구 면적, ΔP 는 오리피스 전후의 압력차이다.

이때, 오리피스에 작용하는 저항은 쉽게 선형적으로 표현할 수는 없으므로 다음과 같은 식을 사용한다.

$$R = \frac{1}{f(C_d, A, \Delta P^{-1/2})} \quad (2)$$

식 (1), (2)를 이용하면 오리피스를 통하여 흐르는 유량은 아래와 같이 표현할 수가 있다.

$$Q = \frac{1}{R} \cdot \Delta P \quad (3)$$

유체의 압축성은 아래의 식으로 나타내었다.

$$C = \frac{V}{\beta} \quad (4)$$

밸브내 피드백 기구에 위치한 스프링은 아래와 같이 나타낸다.

$$F = k \cdot x \quad (5)$$

여기서, k 는 스프링 상수, x 는 밸브의 변위이다. Fig. 2는 식 (2)~(5)를 이용하여 표현한 비례전자 감압밸브의 본드선도를 나타낸 것이다. 밸브에 작용하는 힘은 두가지로 공급 압력과 밸브내 스톨에 작용하는 솔레노이드에 인가되는 전기력이 된다. 유압 공급측 부분과 배출측 부분의 오리피스에 의한 저항을 고려하였으며, 피드백 기구에 있는 스톨의 오리피스 영향도 고려하여 본드 선도로 나타내었다. 이때, 스톨의 작동 변위가 매우 작은 관계로 관성은 무시하였다. 또한, 밸브를 구동시키는 앰프의 고유 주파수가 밸브보다 매우 빠르므로 밸브에 인가되는 전기적 신호는 단순히 전압에 비례한 값만을 가지는 것으로 간주하여 해석하였다. 따라서 1접점에서는 밸브 각 부분의 유량과 저항을 나타낼 수 있으며, 0접점에서는 밸브 내 압력을 나타낼 수 있다. 특히 피드백 기구에 흐르는 유량의 변화에 의하여 스톨의 변위에 의한 압력과 유량에 영향을 미치므로 본드선도의 에너지 변환 방법에 의하여 트랜스포머(transformer)을 이용하여 나타내었다.

Fig. 2의 본드 선도로부터 밸브 출력측 압력과 피드백 기구의 압력 및 스프링력을 상태변수로 하여 상태 방정식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\dot{e}_4 = -\left(\frac{1}{C_1 R_2} + \frac{1}{C_1 R_6}\right)e_4 - \frac{1}{C_1 R_6} e_8 + \frac{1}{C_1 R_2} S_e \cdot P \quad (6)$$

$$\dot{e}_8 = -\frac{1}{C_8 R_6} e_4 - \left(\frac{m^2}{C_8 R_{12}} + \frac{1}{C_8 R_6}\right)e_8 - \frac{m}{C_8 R_{12}} e_{13} + \frac{m}{C_8 R_{12}} S_e \cdot V \quad (7)$$

$$\dot{e}_{13} = -\frac{m}{C_{13} R_{12}} e_8 + \frac{1}{C_{13} R_{12}} e_{13} + \frac{m}{C_{13} R_{12}} S_e \cdot V \quad (8)$$

본드선도에 의하여 비례전자 감압밸브는 3차 시스템으로 나타낼 수 있으며, 밸브 입구에 주어지는 공급 압력과 밸브내 솔레노이드에 가해지는 전기적 신호에 의하여 밸브 출력측 부하 압력이 변화함을 알 수 있다.

밸브에서 순간적인 부하측 압력 변화에 의하여 밸브로 공급되는 압력의 변화가 존재하기 때문에 본드선도에서 알 수 있듯이 공급측 압력을 고려하여 모델링을 수행하였다. 그러나 공급측 유량이 부하측 유량보다 월등히 크다고 간주한다면 이는 무시할 수가 있으며, 본 연구에서는 비교적 작은 용량의 유압 실린더 내 압력 변화에 대해서 고려한다고 가정하였기 때문에 밸브 공급측 압력 변화는 밸브 출력측 압력 변화보다도 매우 작으며, 릴리프(relief) 밸브에 의하여 공급측 압력은 밸브 작동에 관계없이 일정한 압력을 나타내므로 무시할 수 있다. 따라서, 위 식들을 사용하여 비례 전자 밸브 개방 조작시 즉, 압력 용기 내 압력이 상승하도록 제어할 때 밸브에 인가되는 전기적 신호에 따른 입력 전압 $E(s)$ 와 부하 압력 $P_l(s)$ 사이의 전달 함수를 구하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

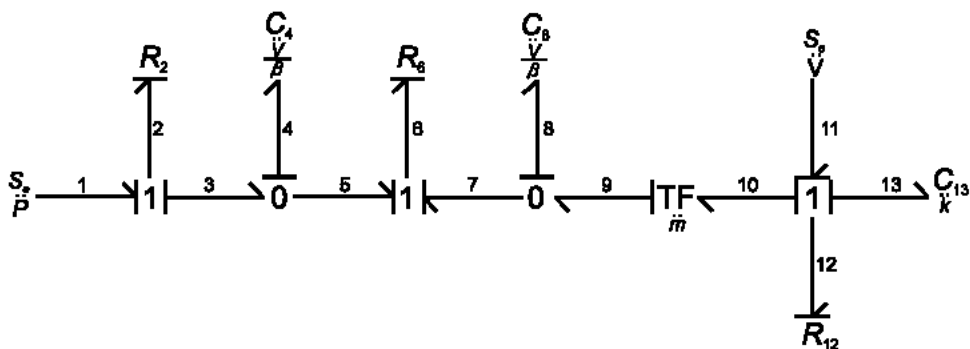


Fig. 2 Bond graph of the proportional pressure control valve

$$G_p(s) = \frac{P_1(s)}{E(s)} = \frac{s + b_0}{s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (9)$$

식 (9)는 기존의 미분 방정식에 의한 해석방법으로 구한 전달함수⁷⁾와 같은 형식을 보여주므로, 본드선도를 이용한 비례전자 감압밸브 모델링에 대한 정확도를 확인할 수 있다.

현실적으로, 식 (6)~(8)의 상태 방정식에서 표시된 각종 물리 인자들 가운데서 부하 압력과 부하 유량 값은 동작점을 벗어나에 따라 크게 변화하는 특징이 있고, 밸브내 비례 솔레노이드의 동특성과 전자력, 스프링 밸브의 마찰 계수 및 스프링 상수 등은 예측하기가 어려우므로, 스텝상의 제어 입력 변화에 따른 응답으로부터 제어 대상의 계수 값을 구하는 방법이 사용되었으며, 본 연구에서는 기존의 비례전자 감압밸브의 연구 결과를 인용하여⁷⁾ 제어 대상의 계수 값들을 식 (9)와 같이 3차 계로 설정하여 제어 대상의 동특성 변화를 표현하였다.

각각의 계수 값은 $a_2=177$, $a_1=3660$, $a_0=98266$, $b_0=98266$ 으로 정하였다.

Fig. 3은 제어 대상의 단위 스텝 응답에 대한 수치 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

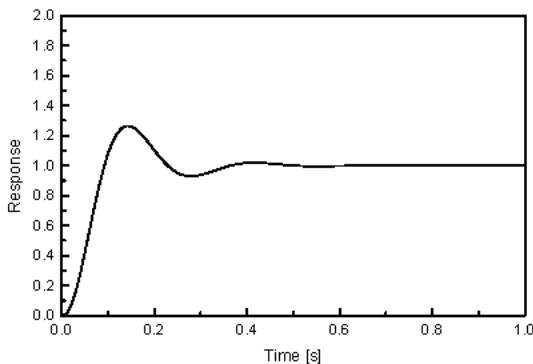


Fig. 3 Simulation result of step response of the objected control system

3. 예견 제어기 설계

기준 입력이나 외란의 예견 정보를 얻을 수 있는 경우에는 이 정보를 이용하여 미래의 제어 대상의 변화를 알 수가 있다. 예견 제어에는 크게 두가지 방법이 사용되고 있다²⁾ 미래의 기준 입력의 변화를 추종하도록 현재 시점에서의 제어 입력

을 결정하는 방법과 미래의 제어 출력을 예측하여 미래의 목표치와의 오차를 최소로 하도록 제어 입력을 결정하는 방법이다.

본 연구에서 제안한 예견 제어기는 미래의 기준 입력과 제어 대상의 동특성 변화를 이용하여 미래의 기준 입력의 변화량과 기준 입력과 제어 출력 사이의 제어 오차를 최소로 하도록 평가 함수(cost function)를 이용하는 방법을 사용한다. 이 평가 함수는 제어 오차와 과거 제어 입력 및 미래 제어 입력이 최소가 되도록 제어 입력을 결정한다. 일반적으로 최적 제어는 관측기를 사용하여 상태 피드백을 하지만, 본 연구에서는 단순히 현재의 출력만을 이용하여 제어기의 계인을 계산한다.

본 비례전자 감압밸브를 이용한 압력 제어 시스템을 디지털 제어계로 설계하기 위하여 이산시간 시스템의 상태공간 모델식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} X(k+1) &= AX(k) + BU(k) \\ Y(k) &= CX(k) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $X(k)$, $U(k)$, $Y(k)$ 는 각각 $t=kT$ ($k=0, 1, 2, \dots$)일 때의 상태 벡터, 입력 벡터 및 출력 벡터이다.

제어 대상 $G_p(s)$ 는 선형이라고 간주하고, 식 (10)을 차분 방정식으로 나타내면 일반적으로 아래와 같이 나타낼 수 있다⁸⁾

$$\begin{aligned} y(k) + a_{n-1}y(k-1) + \dots + a_0y(k-n) \\ = b_{n-1}u(k-1) + b_{n-2}u(k-2) + \dots + b_0u(k-n) \end{aligned} \quad (11)$$

위 식에 외란의 영향을 고려하고 지연 연산자 (z^{-1})를 이용해서 이산시간 상태 방정식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} A \cdot y(t) &= B \cdot u(t-1) + d(t) \\ y(t) &= H \cdot u(t-1) + D \end{aligned} \quad (12)$$

$$A = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}$$

$$B = b_0 + b_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}$$

$$\begin{aligned} H &= A^{-1} \cdot B \\ &= h_0 + h_1z^{-1} + h_2z^{-2} + \dots + h_nz^{-n} \end{aligned}$$

$$D = (1 - z^{-1})d(t)$$

여기서, $y(t)$ 는 제어 출력, $u(t)$ 는 제어 입력,

$\hat{d}(t)$ 는 제어 대상에 가해지는 외란이다.

식 (12)를 현재 시점 (t)에서의 입력 $u(t)$ 에 대한 미래의 출력 $y(t+1)$ 을 나타내는 식으로 변형하면,

$$y(t+1) = y(t) + H \cdot (1 - z^{-1})u(t) + D(t+1) \quad (13)$$

으로 나타낼 수 있다. 따라서, 미래의 시간 ($t+k$)에서의 이산시간 상태 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{y}(t+k) = \hat{y}(t+k-1) + H \cdot (1 - z^{-1}) \cdot \hat{u}(t+k-1) + \hat{D}(t+k) \quad (14)$$

본 연구에서는 식 (10)의 상태 공간 모델식을 이용한 제어계를 설계하기 위하여 DMC(Dynamic Matrix Control) 방법을 이용하였다⁹⁾ 따라서, 식 (14)는 아래와 같은 식으로 표현 할 수가 있다.

$$Y = G \cdot U + H + D \quad (15)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Y^T &= [y(t+1), \dots, y(t+n)] \\ U^T &= [(1-z^{-1}) \cdot u(t), \dots, \\ &\quad (1-z^{-1}) \cdot u(t+n-1)] \\ H^T &= [H(t+1), \dots, H(t+n)] \\ D^T &= [D(t+1), \dots, D(t+n)] \end{aligned}$$

이며, G 는 $n \times n$ 행렬로 시간에 따른 제어 입력과 제어 출력의 비를 이용하여 본 연구에서는 다음과 같이 정의하였다.

$$G = \begin{bmatrix} H_0 & \dots & 0 \\ H_0 + H_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

식 (15)를 이용하여 현재 시점 (t)에서의 제어 입력 $u(t-1)$, $u(t-2)$, ...와 제어 출력 $y(t)$, $y(t-1)$, $y(t-2)$, ...을 표현할 수가 있다.

이 때, 본 연구에서는 현재 시점에서 기준 입력과 제어 출력의 오차 $e(t)$ 와 제어 입력의 변화량 $\Delta u(t) (= u(t) - u(t-1))$ 을 평가 함수로 다음과 같이 정의하였다.

$$J = e^T e + \lambda \Delta u^T \Delta u \quad (16)$$

여기서, λ 는 제어 입력에 대한 가중치이다.

따라서, 평가함수 식 (16)을 최소로 하는 제어 입력을 구하면 아래와 같다.

$$U = (G^T \cdot G + \lambda)^{-1} \cdot G^T \cdot (r - H) \quad (17)$$

여기서, r 은 기준 입력이다.

4. 수치 해석 및 고찰

본 절에서는 수치 시뮬레이션을 통하여 본 연구에서 제안한 제어 알고리즘의 유용성을 유압 서보 시스템에 적용하여 시스템의 과도 상태와 외란 제어 성능에 대하여 조사하였다.

제어 대상의 전달 함수를 ZOH(Zero Order Holder)를 이용하여 이산화 하였으며, 본 연구에서 사용한 비례전자 감압밸브의 주파수 응답을 고려하여 샘플링 시간을 10 [ms]로 정하였다.⁶⁾ 그 결과 식 (9)를 이산시간 전달 함수로 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} G_p(z) &= (1 - z^{-1}) \cdot z G_p(s) \\ &= \frac{0.01091z^{-1} + 0.02928z^{-2} + 0.004539z^{-3}}{1 - 1.975z^{-1} + 1.19z^{-2} - 0.1703z^3} \end{aligned} \quad (17)$$

위 식을 이용하여 본 연구에서 사용한 제어기의 각 게인 값들을 구하였다. 제어 대상의 파라미터 예측 단계 k 는 3으로 결정하였으며, 제어 입력에 들어가는 가중치는 양호한 응답이 나타날 수 있도록 시뮬레이션을 통하여 시행착오적으로 조정하여 최적의 값을 선택하였다.

본 수치 시뮬레이션에 사용한 제어 입력 게인은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} G &= \begin{bmatrix} 0.0109 & 0 & 0 \\ 0.05075 & 0.0109 & 0 \\ 0.0918 & 0.05075 & 0.0109 \end{bmatrix} \\ \lambda &= \begin{bmatrix} 0.07 & 0 & 0 \\ 0 & 0.07 & 0 \\ 0 & 0 & 0.07 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Fig. 4는 예견 제어기를 사용한 제어 대상의 단

위 제단 응답을 나타낸 그림으로, 실선은 제어 출력, 파선은 제어 입력이다. 제어 대상의 단위 제단 응답을 나타낸 Fig. 3과 비교할 때, 예측제어기를 사용할 경우에는 정착 시간이 0.1 [s]정도로, 0.5 [s]에 비하여 상당히 짧아졌음을 확인할 수 있다. 이것은 초기에 제어 입력에 대하여 매우 큰 제어량이 계산되어 비례전자 압력 제어밸브의 구동부 솔레노이드에 큰 전압을 인가하여 밸브의 지연 시간을 단축시키는 효과를 가져오고, 제어 출력이 기준 입력에 가까울수록 작은 제어량을 밸브에 인가함으로써 밸브의 오버슈트(overshoot)를 미연에 방지할 수가 있기 때문이다. 따라서, 본 연구에서 사용된 예견 제어가 본 제어 대상에 매우 효과적인 것을 확인할 수가 있다. 또한, 본 연구에서 제안한 평가 함수에서 제어 입력 변화량에 가중치를 줄 수 있기 때문에, 초기의 제어 입력 제어량에 큰 영향을 주어, 피드포워드(feed forward) 효과를 낼 수가 있는 장점을 가지고 있다.

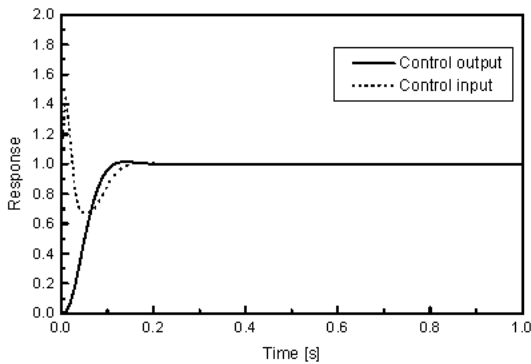


Fig. 4 Simulation results of step response of the objected control system using predictive controller

Fig. 5는 외란을 가할 때의 제어 입력 변화를 나타낸 것이다. 제어 대상이 정상 상태에 있을 때 주기 20 [ms]인 노이즈(random noise)를 인가했을 경우, 매우 신속하게 외란의 변화량에 대하여 제어 입력이 변화함을 확인할 수가 있다. 이는 제어기에서 미래의 기준 입력에 따른 제어 출력을 예견하며, 과거의 입·출력 관계를 고려한 제어량이 제어 대상에 인가되기 때문이다.

따라서, 외란 관측기¹⁰⁾를 사용한 경우의 제어 효과를 얻을 수 있으므로, 유압 시스템에서 밸브의 작동으로 인하여 발생하는 작동유의 맥동¹¹⁾에 대하여 본 제어기를 적용하면 좋은 제어 효과가 있을 것으로 기대된다.

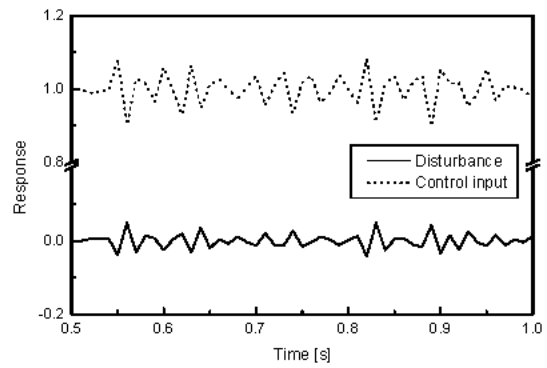


Fig. 5 Simulation results with predictive controller show that variation of control input according to a disturbance

5. 결 론

본 연구에서는, 본드선도를 이용하여 비례전자 감압밸브의 동특성을 해석하였으며, 비교적 작은 용량의 유압 실린더 내 압력 변화를 신속하게 제어하는 기법으로 예견 제어기를 제안하였다.

본드선도를 이용하여 비례전자 감압밸브를 모델링한 결과 솔레노이드에 공급되는 전압의 변화에 따른 밸브의 특성뿐만 아니라 공급 압력에 따른 밸브의 특성도 쉽게 유도할 수 있음을 확인할 수가 있었으며, 제안한 제어 알고리즘은 제어 오차와 제어 입력 신호에 가중치를 추가한 평가 함수를 이용하여, 제어 입력을 계산하는 방법을 이용한 예견제어기이다. 본 제어기는 기준 입력에 대하여 양호한 제어 출력을 얻을 수 있었으며, 외란에 대해서도 매우 강한 강인성을 가지는 것을 수치 시뮬레이션을 통하여 확인할 수가 있었다.

참 고 문 헌

1. D. C. Karnopp, D. L. Margolis and R. C. Rosenberg, "System Dynamic", pp. 1~3, 1999
2. 土谷武士, 江上正, "Digital Preview and Predictive Control", 産業圖書, pp.1~16, 1992
3. K. Aida and T. Kitamori, "Design of Optimal Preview Servomechanism", 計測自動制御學會論文集, Vol. 22, No. 5, pp. 527~534, 1986

4. T. Kitamori and et al "A Design Method of Preview Control for Predesigned Robust Servo Systems", 計測自動制御學會論文集, Vol. 24, No. 11, pp. 1129~1136, 1988
5. 양경욱, 문철진, "예견학습 제어기를 사용한 유압서보계의 압력 제어", 한국기계기술학회지, Vol. 2, No. 2, pp.119~125, 2000
6. 内田油壓機器工業(株), "綜合 카달로그", 日本, pp. 564 ~589, 1990
7. K. U. Yang, I. H. Oh and I. Y. Lee, "Pressure Control of Hydraulic Servo System Using Proportional Control Valve", KSME International Journal, Vol. 13, No. 3, pp. 229~239, 1999
8. 오재웅, "동적시스템해석", 동명사, pp. 227~229, 1995
9. D. W. Clarke, "Application of Generalized Predictive Control to Industrial Process", IEEE Control System Magazine, Vol. 122, pp. 49~55, 1988
10. 김낙인, 이종원, "외란 관측기를 가지는 슬라이딩모드 제어기 설계", 대한기계학회논문집, Vol. 24, No. 4, pp. 866~873, 2000
11. 양경욱 외4명, "고속 온 오프 전자 밸브를 사용한 유압 실린더의 압력 제어", 한국박용기관학회지, Vol. 23, No. 1, pp.69~78, 1999