

# 가중치를 고려한 슬라이딩 모드 제어기 설계 Sliding Mode Controller Design Considering Weight

임 동균\*, 서 병 설\*\*  
(Dong Kyun Lim, Byung Sul Suh)

\*충청대학 전자통신과, \*\*한양대학교 전자통신과

ChungCheong College Dept. electronic communication, Hanyang univ. Dept. electronic communication

## Abstract

The conventional sliding mode controller (SMCr) approach is often impractical or difficult when applied to high order process because the number of tuning parameters in the SMCr increases with the order of the plant. Camacho(1996) proposed the design of a fixed structure sliding mode controller based on a first order plus dead time approximation to the higher-order process. But, there are such problems as overshoot, settling time and command following. They are mainly due to the approximation errors of the time delay term by Taylor series. In this paper, in order to improve Camacho's method, a new Taylor approximation technique considering a weight is proposed.

## I. 서론

제어기 설계에 있어 제어 엔지니어의 주요 역할은 복잡한 제어 시스템을 모델링하여 외란, 센서 잡음 등에도 불구하고 플랜트의 출력이 원하는 제어 성능을 가지도록 하는 것이다. 이러한 설계 방법은 대부분 프로세스의 모델에 기초하게 되는 데 시스템의 수학적 모델이 실제 시스템에 대해 완전하게 기술하지 못하므로 실제 시스템에는 존재하지만 모델링되지 않은 불확실성이나 비선형성이 있고, 모델링 된다 하더라도 측정이 불가능한 경우도 있기 때문에 모델링 오차, 모델링 되지 않는 다이내믹 요소, 외란 등에 의해 야기되는 불확실성이 항상 존재하게 된다. 이렇게 모델링 된 시스템을 이용하여 설계된 제어기는 불확실성에 의해 원하는 제어 성능을 가지지 못하게 되므로 불확실성을 포함한 시스템에 대한 강인한 제어기 설계에 대한 연구가 최근에 활발히 연구되고 있다. 그 대표적인 방법으로 LQG/LTR 방법[1],  $H_{\infty}$  방법[2],  $\mu$  합성 방법[3], LQ-servo 방법[4] 등을 들 수 있다.

이와 같이 이론적으로 정교한 강인한 최적 다변수 선형 제어기 설계 이론들이 개발되었지만 선형 제어기는 지연 시간이 크거나 변하는 공정에서는 성능이 급격히 저하되는 특성을 갖고 있기 때문에 비선형성을 포함한 공정에서는 거의 이용되지 않고 있다. 이러한 비선형성을 포함한 플랜트에 대해 강인하고 안정도를 보장하면서 실제 구현이 용이한 견실한 비선형 제어기의 도입이 요구되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 슬라이딩 모드 제어기가 제안되었고 전력시스템, 서보 시스템, 로봇 제어, 항공기 제어 등 많은 제어 산업 분야에서 널리 이용되고 있다[5-6].

슬라이딩 모드 제어기의 동조 파라미터는 일반적으로 프로세스의 차수에 비례하여 증가하기 때문에 프로세스의 차수가 고차인 경우 동조 파라미터의 수가

증가하게 된다. 이런 경우 파라미터를 결정하기 위해 많은 계산량이 요구되어 실용적이지 못하다는 점이 지적되어 왔다. PID 제어기인 경우 플랜트의 계단 함수 응답으로부터 고차의 프로세스를 시간 지연 항이 포함된 1차 시스템으로 근사하는 반응 곡선 방법이 제시되었다[7]. 이 방법을 이용한 PID 제어기 설계 방법은 시간 지연 항을 근사화 하는 과정에서 발생하는 근사 오차로 인해 큰 모델링 오차가 발생하게 되어 이를 개선하기 위한 많은 연구가 있었다[8-9].

Camacho[10]는 이 기법을 슬라이딩 모드 제어기 설계에 적용하고 시간 지연 항을 1차 Taylor 급수로 근사화 했다. 이 방법은 효율적으로 계산량을 줄일 수는 있었으나 근사화 하는 과정에서 발생한 오차로 인해 큰 모델링 오차가 존재하게 된다. 이러한 모델링 오차의 영향으로 과도한 오버슈트가 발생되고, 시스템의 응답이 오랜 진동을 하게 되므로 효율적인 명령 추종(good command following)을 이룰 수 없는 중요한 문제점을 갖고 있다.

본 논문에서는 Camacho의 방법에서 지연 시간 항을 1차 Taylor 급수로 근사화 할 때 야기되는 오차로 인해 발생하는 모델링 오차를 개선하기 위해 지연 시간 근사 파라미터에 가중치를 고려한 새로운 근사 방법을 적용하였다. 그리고 이를 토대로 새로운 슬라이딩 모드 제어기 설계 방법을 제안하였다.

최적의 가중치를 선정하기 위해 제곱 오차 적분 판정식을 도입하여 지연 시간 항과 근사식의 오차를 최소화 하는 가중치를 결정하였다. 가중치는 근사화 과정에서 무시되었던 고차 항을 보상해 줄 수 있기 때문에 모델링 오차를 줄일 수 있다. 컴퓨터 모의 실험 결과 최적의 가중치는 모델링 오차를 개선할 뿐만 아니라 자유 설계 인자로 작용하여 동조 파라미터들을 적절히 결정할 수 있어 좋은 동조 효과를 얻을 수 있었다. 그리고 큰 모델링 오차와 외란이 존재하는 경우에도 제안된 방법의 우수성을 입증하였다.

## II. 슬라이딩 모드 제어기의 구조

슬라이딩 모드 제어기는 초기의 시스템 상태변수 값을 목표(target) 상태변수 값이 놓여있는 슬라이딩 평면에 접근할 수 있도록 제어기의 구조를 변화시키는 가변 구조 제어 시스템이다. 이 제어기에서는 임의의 시스템 상태 변수를 목표하는 슬라이딩 평면에 도달하기까지의 도달 모드와 도달한 후 슬라이딩 평면을 따라 움직이는 슬라이딩 모드의 두 구간으로 나뉘어 진다. 슬라이딩 모드 동안에는 시스템 파라미터의 변화에 민감하지 않고 외란에도 강한 특성을 가지게 되나 도달모드 동안에는 시스템의 강인성이 보장되지 않는 경향이 있다. 일반적인 슬라이딩 모드 제어기의 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서 슬라이딩 모드 제어기의 입력( $u(t)$ )은 슬라이딩 모드를 제어하기 위한 연속 제어 입력( $u_c(t)$ )과 도달 모드를 제어하기 위한 불연속 제어 입력( $u_d(t)$ )의 두 부분으로 구성되어 있다.

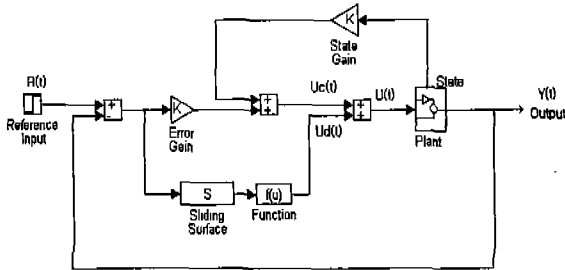


그림 1. 슬라이딩 모드 제어기의 구조

Fig 1. The Structure of Sliding Mode Controller.

## III. 가중치를 고려한 슬라이딩 제어기

사계

Fig 1. The Structure of Sliding Mode Controller.

모델링 오차와 근사화 오차가 비례 관계이므로 근사오차를 개선하기 위해 지연 시간 항의 근사식에 가중치를 고려하고자 한다.

즉, 지연 시간 항을 1차 Taylor 급수로 근사화 한

$$e^{-t_0 s} \approx \frac{1}{t_0 s + 1} \quad (1)$$

을 가중치를 고려하여

$$e^{-t_0 s} \approx \frac{1}{t_0 K_f s + 1} \quad (2)$$

와 같이 근사화 한다. (2)에서 분모의 일차항에 가중치 ( $K_f$ )를 도입하고, 적절한 가중치를 선정하면 1차 Taylor 급수로 근사화 하는 과정에서 무시되었던 고차항을 보상할 수 있어 모델링 오차를 개선할 수 있는 장점이 있다.

주어진 플랜트를 계단 응답을 이용하여 다음과 같이

$$G_m(s) = \frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (3)$$

시간 지연 항이 포함된 1차 모델식으로 근사화 했다고 가정한다[7].

여기서  $K$ 는 이득,  $t_0$ 는 지연 시간,  $\tau$ 는 시상수이다.

(3)에 (2)를 대입하고 정리하면

$$G_m(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \cdot \frac{1}{t_0 K_f s + 1} = \frac{K}{\tau t_0 K_f s^2 + (\tau + t_0 K_f) s + 1} \quad (4)$$

이다. (4)의 분모를 전개하고 정리하면

$$G_m(s) = \frac{K w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (5)$$

이다. 여기서  $\zeta$ 는 감쇠율,  $w_n$ 는 고유 주파수로

$$\zeta = \frac{\tau + t_0 K_f}{2\sqrt{\tau t_0 K_f}} \quad (6)$$

$$w_n = \frac{1}{\sqrt{\tau t_0 K_f}} \quad (7)$$

이다. (6),(7)에서 가중치는 감쇠율과 고유 주파수에 영향을 준다. 그래서 근사화 오차를 최소로 하는 최적의 가중치를 선정하게 되면 모델링 오차를 줄일 수 있다.

### 3.2 가중치를 고려한 슬라이딩 모드 제어 입력

슬라이딩 모드에서의 연속 제어 입력( $u_c(t)$ )을 구하기 위해 Slotine과 Li(1991)가 제안한 적분 슬라이딩 평면[11]을 이용하면, 슬라이딩 평면을

$$S = \frac{de(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int_{t_0}^t e(t) dt \quad (8)$$

으로 선정할 수 있다.  $\frac{dS}{dt} = 0$ 을 만족하는 연속 제어 입력을 얻기 위해 (8)을 시간에 대해 미분하면

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d^2 e(t)}{dt^2} + \lambda_1 \frac{de(t)}{dt} + \lambda_0 e(t) = 0 \quad (9)$$

이다. 이때 오차를 나타내는 식은

$$e(t) = R(t) - x(t) \quad (10)$$

이다. 기준 입력  $R(t)$ 를 계단 입력 함수로 하면 급변하게 되는 응답 부분이 대단히 작은 시간동안 발생한다. 이때 오차를 나타내는 식은

이므로

$$\frac{dR(t)}{dt} = 0, \frac{d^2 R(t)}{dt^2} = 0 \quad (11)$$

이다. (4)를 미분 방정식으로 변환하고 정리하면

$$\frac{d^2}{dt^2} x(t) + \left(\frac{\tau + t_0 K_f}{\tau t_0 K_f}\right) \frac{d}{dt} x(t) + \left(\frac{1}{\tau t_0 K_f}\right) x(t) = \left(\frac{K}{\tau t_0 K_f}\right) u(t) \quad (12)$$

이다. (10),(11),(12)를 (9)에 대입하고 정리하면

$$U_c(t) = \frac{\tau t_0 K_f}{K} \left[ \left(\frac{\tau + t_0 K_f}{\tau t_0 K_f} - \lambda_1\right) \frac{dX(t)}{dt} + \left(\frac{1}{\tau t_0 K_f}\right) X(t) + \lambda_0 e(t) \right] \quad (13)$$

이다.  $\frac{dX(t)}{dt}$  항을 소거하기 위해 동조파라미터  $\lambda_1$ 을

$$\lambda_1 = \frac{\tau + t_0 K_f}{\tau t_0 K_f} \quad [time^{-1}] \quad (14)$$

으로 선정한다. (9)를 라플라스 변환하면

$$(s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0) E(s) = 0 \quad (15)$$

이므로  $e(t)$ 의 응답이 진동이 없이 가장 빠르게 정상 상태에 도달할 수 있는 임계 응답이 되는 조건은

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1^2}{4} = \frac{1}{4} \left( \frac{\tau + t_0 K_f}{\tau t_0 K_f} \right)^2 \quad [\text{time}^{-2}] \quad (16)$$

이다. (14),(16)와 같이 동조 파라미터를 정하면 슬라이딩 모드 제어 입력은

$$U_c(t) = \frac{\tau t_0 K_f}{K} \left[ \left( \frac{1}{\tau t_0 K_f} \right) X(t) + \lambda_0 e(t) \right] \quad (17)$$

이다. 여기서  $K, t_0, \tau$ 는 계단 함수 응답에서 공정 반응 곡선 방법으로 얻어지는 모델식의 파라미터이고,  $\lambda_0, \lambda_1$ 은 (14),(16)로 선정하는 설계 파라미터이다.

### 3.3 가중치를 고려한 도달 모드 제어 입력

도달 모드에서 불연속 제어 입력( $u_d(t)$ )은

$$u_d(t) = K_d \text{sgn}(S) = K_d \frac{S}{|S|} \quad (18)$$

$$\text{여기서 } \text{sgn}(S) = \begin{cases} 1 & \text{if } S > 0 \\ -1 & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (19)$$

이다.  $K_d$ 는 슬라이딩 평면으로의 도달 속도를 나타내는 이득으로  $K_d$ 가 작아지면 도달 시간이 길어지고 반대로  $K_d$ 가 커지면 슬라이딩 모드에서 채터링 문제가 발생하게 되므로 적절한  $K_d$ 의 선정이 요구된다. 그리고, 불연속 함수인 부호 함수( $\text{sgn}(S)$ )가 채터링 현상을 일으키는 한 요인이므로 Camacho는 부호 함수 대신에 포화 함수를 사용하여 도달 모드 제어 입력

$$u_d(t) = K_d \frac{S}{|S| + \delta} \quad (20)$$

을 선정하였다. 여기서  $\delta$ 는 포화 함수의 기울기를 결정하는 상수로  $\delta$ 가 작아질수록 부호 함수에 접근하게 되어, 응답 속도는 빨라지나 채터링 현상이 커지게 된다.  $\delta$ 가 커질수록 포화 함수는 x 축에 접근하게 되어, 채터링 현상이 줄어들게 되나 응답 속도가 느려지게 된다.

Camacho가 제시한  $K_d$ 와  $\delta$ 의 결정식은 다음과 같다.

$$K_d = \frac{0.51}{K} \left( \frac{\tau}{t_0} \right)^{0.76} \quad (21)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12(KK_d\lambda_1) \quad (22)$$

본 논문에서 제시한 가중치를 고려하면  $K_d$ 와  $\delta$ 의 결정식은 다음과 같다.

$$K_d = \frac{0.51}{K} \left( \frac{\tau}{t_0 K_f} \right)^{0.76} \quad (23)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12(KK_d\lambda_1) \quad (24)$$

가중치의 도입으로 가중치가 커지면  $K_d$ 와  $\delta$ 의 값이 작아지게 되어 채터링 현상이 줄어들게 된다. 그러나 너무 작아지게 되면 응답 속도가 느려지게 되므로 적절한 가중치의 선정이 중요하다.

### 3.3 가중치 선정 방법

(2)의 지수 함수와 가중치의 변화에 따른 근사 정도가 달라지므로 최적의 가중치를 선정하기 위해 본 논문에서는

$$J = \int_0^{\infty} \left( e^{-\lambda_0 s} - \frac{1}{t_0 K_f s + 1} \right)^2 ds \quad (25)$$

와 같은 제곱오차적분 판정식을 최소로 하는  $K_f$ 를 구하고자 한다.

슬라이딩 모드에서 발생하는 채터링 현상은 시스템 응답의 진동을 일으킬 수 있으며 모델링 과정에서 무시되었던 시스템의 고주파 동특성을 여기서 제어 대상 시스템을 불안정하게 만들 수 있다. 대부분의 경우 제어하고자 하는 프로세스는 고차인 경우가 많다. 고차인 플랜트를 (3)과 같이 모델링하고 기존의 방법인 (1)로 근사화하게 되면 모델식이 2차식으로 간략화 되는 과정에서 많은 고주파의 동특성을 무시하게 된다.

본 논문에서 제안한 가중치를 고려한 근사 기법은 (3)에서 (4)로의 근사화 과정에서 무시되었던 고차항을 보상해 줄 수 있다. 그래서 기존의 방법보다 고주파 영역의 모델링 오차를 줄여 채터링의 영향을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 (25)를 계산하기 위해 MATLAB의 quad8 함수를 이용하였다.

### 3.4 가중치를 고려한 제어기 설계 절차

가중치를 고려한 새로운 슬라이딩 모드 제어기 설계 절차를 요약하면 다음과 같다.

1. 플랜트의 단위 계단 응답을 구한다.
2. 1의 응답으로부터 공정 반응 곡선 방법으로 시간 지연항이 포함된 1차 근사 모델을 구한다.

$$G_m(s) = \frac{K e^{-\lambda_0 s}}{\tau s + 1} \quad (26)$$

3. 시간 지연항을 가중치를 고려하여 근사화한다.

$$e^{-\lambda_0 s} \approx \frac{1}{t_0 K_f s + 1} \quad (27)$$

4. 최적의 가중치를 구한다.

$$J = \int_0^{\infty} \left( e^{-\lambda_0 s} - \frac{1}{t_0 K_f s + 1} \right)^2 ds \quad (28)$$

5. 제어기 입력은 다음과 같다.

$$U(t) = \frac{\tau t_0 K_f}{K} \left[ \left( \frac{\tau + t_0 K_f}{\tau t_0 K_f} - \lambda_1 \right) \frac{dX(t)}{dt} + \frac{X(t)}{\tau t_0 K_f} + \lambda_0 e(t) \right] + K_d \frac{S}{|S| + \delta} \quad (29)$$

6. 슬라이딩 모드 동조 파라미터를 구한다.

$$\lambda_1 = \frac{\tau + t_0 K_f}{\tau t_0 K_f} \quad [\text{time}^{-1}] \quad (30)$$

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1^2}{4} = \frac{1}{4} \left( \frac{\tau + t_0 K_f}{\tau t_0 K_f} \right)^2 \quad [\text{time}^{-2}] \quad (31)$$

7. 도달 모드 동조 파라미터를 구한다.

$$K_d = \frac{0.51}{K} \left( \frac{\tau}{t_0 K_f} \right)^{0.76} \quad (32)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12(KK_d\lambda_1) \quad (33)$$

## IV. 모의 실험

제안한 방법의 타당성을 검증하고 기존의 제어 방법과 비교하기 위해 Camacho(1996)의 논문에서 고려

한 바 있는 플랜트 (34)을 선정하여 적용하였다.

#### 4.1. 모델링 오차 비교

$$G(s) = \frac{1}{150s^4 + 275s^3 + 113s^2 + 19s + 1} \quad (34)$$

공정 반응 곡선 방법을 이용하여 (34)에 대한 모델식은

$$G_m(s) = \frac{1 \cdot e^{-2.5s}}{13.5s + 1} \quad (35)$$

이다. (2)을 (35)에 대입하면

$$G_{m(s)} = \frac{1}{13.5s + 1} \cdot \frac{1}{2.5K_f s + 1} \quad (36)$$

이다. (36)에서 최적의  $K_f$ 를 구하기 위해 다음의 제곱 오차 적분식을 최소로 하는  $K_f$ 를 MATLAB의 quad8 함수를 이용하여 구한 값은 2.7이다.

$$J = \int_0^{\infty} \left( e^{-2.5s} - \frac{1}{2.5K_f s + 1} \right)^2 ds \quad (37)$$

Camacho의 모델식은

$$G_m(s) = \frac{1}{33.75s^2 + 16s + 1} \quad (38)$$

이고, 제안한 방법의 모델식은 다음과 같다.

$$G_m(s) = \frac{1}{91.125s^2 + 20.25s + 1} \quad (39)$$

주파수 영역에서 플랜트와 두 모델식의 가중치의 영향을 살펴보기 위해 모델들과 플랜트의 크기와 위상에 대한 보드 선도를 각각 그림2에 나타내었다. 그림2에서  $K_f$ 의 증가는 고주파 영역에서 모델링 오차를 개선시키고 가중치  $K_f$ 를 제곱오차적분을 최소화하는 값으로 선정하면 모델링 오차를 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

위에서 설명한 플랜트에 대해 기존의 방법 ( $K_f = 1$ )과 제안한 방법 ( $K_f = 2.7$ ) 각각의 설계 파라미터를 표1에 나타내었다. 가중치는 모델링 오차를 개선할 수 있을 뿐만 아니라 동조 파라미터에 영향을 주었다.

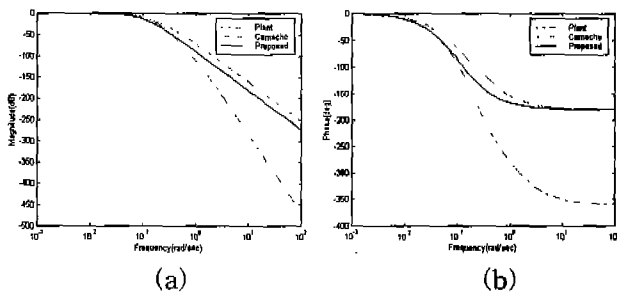


그림2. 플랜트와 모델의 보드 선도  
(a) 크기, (b) 위상

fig 2. Bode Plots of Plant and Two Models.  
(a) Magnitude (b) Phase

#### 4.2 공칭 모델에 대한 동조 효과

동조 파라미터의 동조 효과를 알아보기 위해 100초일 때 0.5의 계단 입력

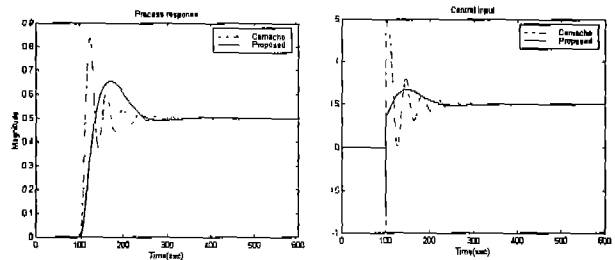
$$R(t) = 0.5u(t-100) \quad (40)$$

을 인가한 동조 효과의 모의 실험 결과는 그림 3과 같다. 그림3에서 제안된 방법은 기존의 방법에 비해 오버슈트와 시스템 응답의 진동이 현저히 감소되었고, 제어 입력에서 채터링 현상이 거의 일어나지 않았다.

표 1. 슬라이딩 모드 제어기의 파라미터

Table 1. Parameters of SMCr

동조방법	$K_f$	$\lambda_1$	$\lambda_0$	Kd	$\delta$
Camacho	1	0.474	0.056	1.84	0.78
Proposed	2.7	0.222	0.012	0.86	0.70



(a) (b)

그림 3. 공칭 모델에 대한 시스템 응답

(a) 프로세스 응답 (b) 제어 입력

Fig. 3. System Responses of Nominal Models.

(a) Process Response (b) Control Input

#### 4.3 모델링 오차에 대한 동조 효과

지금까지 모델링이 적절히 되었다고 가정하고 제어를 설계하고 모의 실험 하였다. 그러나 실제 실험에서는 모델링 할 때 고려하지 못하였던 모델링 오차나 외란 등을 고려해야 한다. 모델링 오차에 대한 강인성을 입증하기 위해 (34)에 대해 설계한 슬라이딩 모드 제어기를 (34)에서 3차항의 계수 275을 (38)과 같이 23으로 변화시킨 플랜트에 적용하고 모의 실험 하였다.

$$G(s) = \frac{1}{150s^4 + 23s^3 + 113s^2 + 19s + 1} \quad (38)$$

모의 실험 결과는 그림4와 같다. 제안한 방법은 모델링이 정확히 되지 않은 불확실성을 포함하는 시스템에도 좋은 동조 결과를 보이고 기존의 방법보다도 우수하다.

#### 4.4 외란에 대한 동조 효과

외란의 영향을 알아보기 위해

$$d = 0.05 \sin(1000t) \quad (39)$$

를 출력 측에 인가하고 모의 실험하였다.

모의 실험 결과는 그림5와 같다. 외란이 있는 경우에

도 제안된 방법이 기존의 방법보다 프로세스 응답이 우수하고, 제어 입력에서 채터링 현상이 현저히 작다.

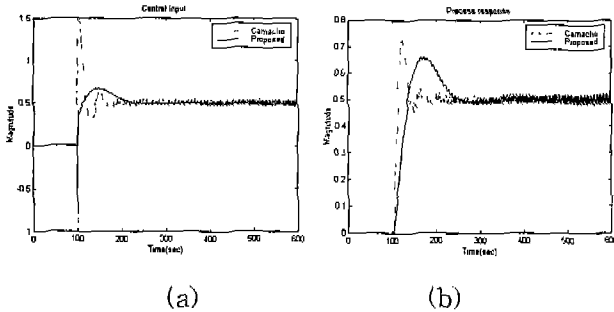


그림 4. 모델링 오차에 대한 시스템 응답  
(a) 프로세스 응답 (b) 제어 입력

Fig. 4. System Responses of Models with Modeling Error.

(a) Process Response (b) Control Input

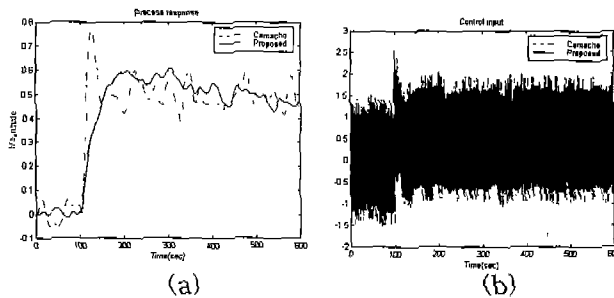


그림 5. 출력측 외란 입력이 있을 때 시스템 응답  
(a) 프로세스 응답 (b) 제어 입력

Fig. 5. System Responses of Two Models with Output Disturbance.

(a) Process Response (b) Control input

## V. 결론

본 논문에서는 Camacho가 제안한 방법에서 시간 지연 항을 1차 Taylor 급수로 근사할 때 발생하는 오차를 최소화하기 위해 가중치를 고려한 새로운 Taylor 근사화 기법과 이를 토대로 슬라이딩 모드 제어기의 설계 방법을 제안하였다.

적절한 가중치를 선정하면 모델링 오차를 개선할 수 있고, 도달 모드 제어 입력의 동조 파라미터를 적절히 선정할 수 있어 시스템 응답의 진동과 채터링 현상, 과도한 오버슈트를 현저히 줄일 수 있었다.

본 논문에서는 제곱오차적분 판정식을 최소화하는 가중치를 최적 값으로 선정하였고 또한 컴퓨터 모의 실험을 통해 제안된 방법이 모델링 오차와 외란에 대해서도 기존의 방법보다도 우수한 동조 결과를 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] G. Zames, "Feedback and optimal sensitivity : model reference transformation multiplicative seminorms, and approximate inverses", *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-26, pp. 301-320, 1981.
- [2] J. C. Doyle, and G. Stein, "Multivariable feedback design : Concepts for a classical/modern synthesis", *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. AC-26, pp. 4-16, Feb., 1981.
- [3] J. C. Doyle, *Lecture notes in advances in multivariable control, ONR/Honeywell Workshop*, Minneapolis, 1984.
- [4] 윤성오, 서병설, "명령 추종과 출력 측 외란 제거를 위한 LQ-Servo 설계", *제어·자동화·시스템공학 회 논문지*, 제 3권, 제 5호, pp 443-449, 1997.
- [5] J. Y. Hung, W. B. Gao, and J. C. Hung, "Variable structure control: A survey", *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol 40, no. 1, pp. 2-22, Feb., 1993.
- [6] H. Hasimoto, H. Yamamoto, "Brushless Servo Motor Control Using Variable Structure Approach", *IEEE Trans. IA*, vol. 24, no. 1, pp. 160-176, Jan. 1988.
- [7] G. H. Cohen, G. A. Coon, "Theoretical Investigations of Retarded Control", *Trans. ASME.*, vol. 75, pp 827, 1953
- [8] B. S. Suh, and D. K. Lim, "New PID identification algorithm base on frequency scaling", *Proc. of 40th Midwest Symposium On Circuits and Systems of IEEE*, Sacramento, 1997.
- [9] J. T. Lee, "On-Line PID Controller Tuning from a single, closed-loop test", *AICHE J.*, vol. 35, pp 434-440, 1982
- [10] O. E. Camacho, *A new approach to design and tune sliding mode controllers for chemical process*, Ph. D. dissertation, Dept. of Chemical Engineering, Univ. of South Florida, 1996.
- [11] J. J. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, New-Jersey.