

# 확장형 감소차수 관측기를 이용한 전기식 조종날개 구동장치의 슬라이딩 모드 제어

A sliding mode control of an electro-mechanical fin actuation system using extended reducer-observer(ERO)

구정회\*  
Gu, Jeong-Hoi

## ABSTRACT

The objective of this paper is to design a sliding mode controller of an electro-mechanical fin actuation system using extended reducer-observer(ERO) which is used in order to estimate the velocity. The employed observer enables proper estimation of the plant state variables, even in the case of the constant or slow varying load torque disturbances. The effectiveness of this control scheme is verified by comparison with a PID control through a series of simulation studies. The simulation results show that the sliding mode control designed with the ERO gives good control performances.

주요기술용어(주제어) : Extended Reducer-Observer(확장형 감소차수 관측기), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어기), Electro-mechanical Fin Actuation System(전기식 조종날개 구동장치)

## 1. 서론

최근 모터 관련 기술의 발전으로 인하여 정밀 속응 제어를 요구하는 기기의 구동을 위한 서보 응용 분야에 모터를 이용한 전기식 구동장치의 사용이 급격히 증대되고 있으며, 유도무기의 조종날개 구동장치로도 전기식 구동장치가 널리 이용되고 있다. 유도무기용 구동장치는 공간이 협소하면서도 고출력을 요구하기 때문에 포화요소와 같은 비선형성과 모터의 발열로 인한 파라미터 변동 및 유도탄이 비행중에 받는 공기력으로 인한 외란(disturbance)이 존재

한다. 따라서 이와 같은 문제에 잘 대처하기 위해서 구동장치의 위치제어기로 고전 제어이론을 적용하기 보다는 강건 성능이 높은 현대 제어이론을 적용하는 것이 바람직하다.

강건제어기로는 슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Control : SMC)<sup>[1]</sup>, H<sup>∞</sup>제어기<sup>[2]</sup>, 시간지연 제어기(Time Delay Controller : TDC)<sup>[3]</sup> 등 여러 가지 방법이 제안되었으며, 본 논문에서는 이 중 SMC를 적용하였다.

시스템의 파라미터 값의 변화와 외란으로 대별되는 섭동(perturbation)의 상한 값을 적용하는 대신에 Elmal<sup>[4]</sup>와 Moura<sup>[5]</sup>가 제안한 시간지연 신호(time delayed signal)를 이용하여 그 값을 추정하여 이용하는 섭동 추정기를 가진 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control with Perturbation Estimation :

† 2005년 6월 17일 접수~2005년 9월 9일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : 9334931@hanmail.net

SMCPE)에 기준모델을 추종하는 기법을 추가한 모델 추종 슬라이딩 모드 제어(Model Following Sliding Mode Control : MFSMC)<sup>[6]</sup> 기법을 조종날개 구동 장치의 위치제어기로 적용하였다.

모델추종 슬라이딩 모드 제어기는 위치, 속도, 가속도 정보를 이용하여 위치제어를 수행한다. 지금까지 조종날개 구동장치는 속도센서를 이용하여 얻은 속도 정보와 이를 미분한 가속도 정보를 모델추종 슬라이딩 모드 제어기에 적용하였다. 이러한 방법은 물리적으로 정확한 속도 정보를 얻을 수 있어 안정성을 가지며 정확한 위치제어를 수행할 수 있지만 하드웨어인 속도센서의 추가로 인한 경제성 측면, 센서장착 공간 확보 및 고장 가능성 등의 측면에서 불리하다. 이러한 단점들을 해결하기 위해 소프트웨어적으로 구동기의 속도를 추정할 수 있는 관측기의 적용이 요구되었다. 조종날개의 위치신호로부터 속도를 추정하기 위해 관측기 사용이 가능하지만 구동장치의 비선형성 및 파라미터 변동 등의 요인으로 일반적인 관측기를 적용하는 것은 쉽지 않다. 일반적으로 사용하는 전차수(Full Order Observer : FOO) 혹은 감소차수 관측기(Reduce Order Observer : ROO)를 적용할 경우 무부하 상태에서는 속도 추정을 잘 하지만 부하시 관측기로 추정된 속도 값과 실제 속도 센서값 사이에 차이가 나타나게 된다. 따라서 본 논문에서는 무부하 및 부하시 추정능력이 뛰어난 확장형 감소차수 관측기(Extended Reducer-Observer : ERO)<sup>[7]</sup>를 적용하였다. 확장형 감소차수 관측기는 일반적인 감소차수 관측기의 형태에 적분형태의 상태변수를 추가함으로써 일반적인 관측기가 갖는 부하시의 관측오차를 극복한 보다 성능이 우수한 관측기로서 계산이 간단하여 실제 시스템에 적용이 용이하다.

본 논문에서는 확장형 감소차수 관측기의 유도과정을 설명하고, 전기식 조종날개 구동장치에 대해 확장형 감소차수 관측기가 적용된 모델추종 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 확장형 감소차수 관측기를 적용한 조종날개 구동장치에 대해 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며 속도센서를 적용한 모델추종 슬라이딩 모드 제어기의 경우와 PID 제어를 적용한 경우와도 비교하였다.

## 2. 확장형 감소차수 관측기

선형 단일 입출력(Single Input Single Output : SISO) 시스템의 미분 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}^{(n)} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $x = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ 는 상태벡터(state vector),  $u$ 는 제어입력벡터(input vector),  $y$ 는 출력벡터(output vector)이며 행렬  $A, B, C$ 는 각 벡터 사이의 상호관계를 나타내는 행렬들이다.

식 (1)을 2차 미분방정식으로 가정하고 샘플링 주기  $T$ 로 하는 이산시간 상태방정식은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ex(k) + fu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서,

$$\begin{aligned} x(k) &= [x_1(k) \ x_2(k)]^T, \\ E(T) &= \begin{bmatrix} 1 & T_m(1 - e^{-T/T_m}) \\ 0 & e^{-T/T_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & e_1 \\ 0 & e_2 \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{3}$$

$$f(T) = \begin{bmatrix} K_m(T + T_m e^{-T/T_m} - T_m) \\ K_m(1 - e^{-T/T_m}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0]$$

위의 식 (3)에서  $K_m$ 과  $T_m$ 은 각각 계인값과 기계적 시정수를 나타낸다.

시스템 (2)를 위한 일반적인 관측기 형태는 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{x}(k+1) = (E - gC) \hat{x}(k) + fu(k) + gy(k) \tag{4}$$

여기서, 관측기 계인은  $g = [g_1 \ g_2]^T$  이다.

시스템 (2)를 위해 다음과 같은 확장형 전차수 관

측기를 적용하는 것이 가능하다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_e(k+1) &= (E_e - G_{e1}D_e)\hat{x}_e(k) \\ &+ f_e u(k) + G_{e2} \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \hat{x}_e(k+1) &= \begin{bmatrix} \hat{x}(k+1) \\ \hat{x}_3(k+1) \\ \hat{x}_4(k+1) \end{bmatrix}, E_e = \begin{bmatrix} 1 & e_1 & 1 & 0 \\ 0 & e_2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ f_e &= \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, D_e = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$G_{e1} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 \\ g_2 & 0 \\ g_3 & 0 \\ 0 & g_4 \end{bmatrix}, G_{e2} = G_{e1} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1/T & -1/T \end{bmatrix}$$

식 (5)의 유도 근거는 식 (4)에 나타난 일반적인 형태의 관측기 형태에서 적분 제어(integral control) 방법 중의 하나인 상태변수 추가방법을 통해 이전 상태변수인  $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ 에 관측기 게인  $g_3, g_4$ 를 곱해서 적분 제어 상태변수인  $\hat{x}_3$ 과  $\hat{x}_4$ 를 추가하여 식 (5)와 같은 형태의 확장형 전차수 관측기<sup>[7]</sup>를 구성한 후 플랜트의 상태변수를 추종하게 하므로써 식 (4)와 같은 일반적 형태의 전차수 혹은 감소차수 관측기가 갖는 부하시의 관측오차를 극복 할 수 있다.

식 (5)는 본 논문의 제어 대상인 전기식 조종날개 구동장치의 위치값과 속도값을 모두 추정할 수 있는 확장형 전차수 관측기 형태이다. 그런데, 본 시스템에서는 위치센서(Potentiometer)에 의한 위치값을 계속하여 사용하므로 식 (5)를 보다 간략화한 형태인 식 (7)과 같은 확장형 감소차수 관측기를 통하여 속도값만을 추정하여 슬라이딩 모드 제어기의 입력값으로 사용하였다<sup>[7]</sup>.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{x}_2(k+1) \\ \hat{x}_4(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} e_2 - g_2 e_1 & 1 \\ -g_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_2(k) \\ \hat{x}_4(k) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} g_2 & 0 \\ 0 & g_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c(k+1) - c(k) - f_1 u(k) \\ c(k)/T - c(k-1)/T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_2 \\ 0 \end{bmatrix} u(k) \end{aligned} \quad (7)$$

관측기의 게인값의 결정은 관측기의 극점이 모두 같고  $\sigma_z = \exp(-2\pi f_0 T)$ 로 주어진다고 가정하면 다음과 같은 관계수식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} g_2 &= (1 + e_2 - 2\sigma_z)/e_1 \\ g_4 &= (1 - \sigma_z)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$\sigma_z = \exp(-2\pi f_0 T)$ 에서  $f_0$ 값은 관측기의 주파수반응 대역을 나타낸다.  $f_0$ 값을 너무 작게 설정하면 속도 추정 속도가 느리게 되고 반대로 너무 큰 값을 설정하면 추정 속도는 빠르나 속도를 입력으로 사용하는 제어기의 안정도에 나쁜 영향을 줄 수 있게 된다. 따라서 시행착오법에 의해 적절한 값을 결정하게 된다.

### 3. 모델추종 슬라이딩 모드 제어기

SMC의 경우 강건성을 확보하기 위하여 예상되는 파라미터의 변화와 외란의 한계치를 사용하므로 한계치가 지나치게 적용될 경우 추종성능이 저하되므로 강건성과 추종성능 사이의 절충과정이 필요하다. 그러나 시간지연 신호 기법을 이용하는 SMCPE를 적용할 경우 섭동 값을 추정할 수 있으므로 이러한 절충 과정을 줄일 수 있으며, 강건성을 확보하기 위한 최소한의 한계 값을 사용할 수 있으므로 추종성능도 개선되는 효과를 갖는다. 또한 모델추종 기법을 적용할 경우 기준입력의 미분 값들을 필요로 하지 않기 때문에 위치추종 시스템에서 요구되는 계단명령(step command)에 대해 유리하다.

MFSMC의 설계<sup>[6]</sup>는 슬라이딩 면의 결정과 빠른 시간 내에 안정적으로 선정된 슬라이딩 면에 접근하도록 하는 동력학을 설계하는 두 부분으로 나눌 수

있다.

가. 기준모델 추종형 슬라이딩 면  
식 (9)와 같은 시스템의 기준모델을 고려해 보자.

$$x_m^{(n)} + a_1 x_m^{(n-1)} + \dots + a_n x_m = a_n x_r \quad (9)$$

여기서,  $x_m$ 은 기준모델의 출력,  $x_r$ 은 기준입력을 나타낸다. 완전한 추종상태인 경우를 고려하면 식 (10)을 얻을 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} x_r &= x_m \\ x_r^{(k)} &= 0, \quad k = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)인 경우를 고려하면 식 (9)는 다음과 같이 된다.

$$e^{(n)} + a_1 e^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{e} + a_n e = 0 \quad (11)$$

여기서,  $e (= x_m - x_r)$ 는 추종오차를 나타낸다. 식 (11)을 SMC의 최종목표인 슬라이딩 면에 도달한 상태( $\sigma = 0$ )로 설정하고, 추종오차를 없애기 위하여 적분형을 사용하면 식 (12)와 같이 될 수 있다.

$$\dot{\sigma} = e^{(n)} + a_1 e^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{e} + a_n e \quad (12)$$

식 (10)을 고려하고 기준모델 출력 대신 시스템 출력을 사용하면 슬라이딩 함수는 다음과 같이 된다.

$$\sigma = x^{(n-1)} + a_1 x^{(n-2)} + \dots + a_{n-1} x + a_n \int (x - x_r) dt \quad (13)$$

따라서 식 (13)과 같은 슬라이딩 면을 선정할 경우 제어시스템은 식 (9)를 추종하게 된다.

나. 접근 모드 동력학 설계

SMC는 시스템을 슬라이딩 면을 향하여 움직이게 하는 접근상태와 추적오차를 점근적으로 0에 수렴하

도록 하는 슬라이딩 상태로 구성된다. 안정적인 슬라이딩 면으로의 접근과 수렴을 보장하기 위하여 잘 알려진 인력 조건식(attractivity condition)  $\sigma \dot{\sigma} \leq 0$ 를 만족시키는 다음과 같은  $\sigma$ -동력학을 제안한다.

$$\dot{\sigma} = -h \sigma - k \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (14)$$

여기서,  $h$ 와  $k$ 는 양수이며,  $\operatorname{sgn}(\sigma)$ 는 부호함수(sign function)이다. 식 (14)를 사용하여  $u$ 에 대하여 풀면 제어법칙은 다음과 같이 된다.

$$u = g^{-1}[-h \sigma - k \operatorname{sat}(\sigma) - f - \xi - a_n e - \hat{\psi}] \quad (15)$$

여기서,  $\xi = \sum_{k=1}^{n-1} a_k x^{(n-k)}$ 이며, 채터링을 방지하기 위하여  $\operatorname{sgn}(\sigma)$ 는 다음과 같이 Slotine<sup>[1]</sup>이 제안한 포화함수로 대체하였다.

$$\operatorname{sat}(\sigma) = \begin{cases} \sigma / \epsilon, & |\sigma| \leq \epsilon \\ \operatorname{sgn}(\sigma), & |\sigma| > \epsilon \end{cases}$$

또한 시스템 불확실성( $\Delta f + \Delta g u$ )과 외란( $d$ )을 합한 섭동  $\psi$ 에 대한 추정값  $\hat{\psi}$ 는 식 (16)과 같이 표현된다.

$$\hat{\psi} = \hat{x}^{(n)} - f - g u_L \quad (16)$$

식 (16)에서 현재 제어의 추정 값으로  $u \cong u_L$ 가 이용되었다. 이 근사 값은 제어 동작 자체보다 샘플링 속도가 훨씬 빠른 경우 정당화될 수 있다. 또한  $\hat{x}^{(n)}$ 에 대해서는 1차 전방 차분 근사화가 사용되었다.

$$\hat{x}^{(n)} = [\hat{x}^{(n-1)} - x^{(n-1)} u_L] / L \quad (17)$$

경계  $\epsilon$ 으로의 인력조건을 강화하기 위하여 이득  $k$ 는  $\eta | \hat{\psi} |$ 이며  $\eta$ 는 실험적으로 결정되는 상수이다.

#### 4. 확장형 감소차수 관측기를 이용한 슬라이딩 모드 제어기 설계

가. 확장형 감소차수 관측기 설계  
 조종날개 구동장치의 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1/\tau_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_m \end{bmatrix} u(t) \quad (18)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}$$

위 식에서  $\tau_m$ 과  $b_m$ 은 각각 구동장치의 기계적 시정수와 입력이득이며 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_m = \frac{R_m J_e}{R_m B + K_T K_B}$$

$$b_m = \frac{K_T}{R_m J_e N}$$

위의 (18)식의 연속 상태방정식에 표 1의 구동장치 파라미터를 적용하여 샘플링 시간을 1ms로 하는 이산시간 상태 방정식은 식 (19)와 같이 표현할 수 있다.

[표 1] 조종날개 구동장치 파라미터

Sym.	Description	Value	Unit
B	Motor viscous damping	$2.1 \times 10^{-6}$	lb-in/(deg/sec)
$J_e$	Equivalent inertia	$9.12 \times 10^{-7}$	lb-in-sec <sup>2</sup>
$B_a$	Link viscous damping	0.0175	lb-in/(deg/sec)
$J_a$	Link inertia	$4.27 \times 10^{-4}$	lb-in-sec <sup>2</sup>
$K_B$	Back emf constant	$6.56 \times 10^{-4}$	volt/(deg/sec)
$K_T$	Torque constant	0.3257	lb-in/A
$L_a$	Motor inductance	0.26	mH
$R_m$	Motor resistance	0.82	ohm
$V_{max}$	Input voltage	28	volt
N	Gear ratio	262.5	-
$K_a$	Link stiffness	2000	lb-in/deg

$$\begin{bmatrix} \theta(k+1) \\ \omega(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.0009 \\ 0 & 0.7498 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0008 \\ 1.4415 \end{bmatrix} u(k) \quad (19)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix}$$

위의 이산시간 상태 방정식에 대한 확장형 감소차수 관측기는 식 (20)과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega}(k+1) \\ \hat{x}_4(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_2 - g_2 e_1 & 1 \\ -g_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}(k) \\ \hat{x}_4(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_2 & 0 \\ 0 & g_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(k+1) - \theta(k) - f_1 u(k) \\ \theta(k)/T - \theta(k-1)/T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_2 \\ 0 \end{bmatrix} u(k) \quad (20)$$

본 시스템에서는 1ms로 제어루틴을 반복하므로 샘플링 시간을 1ms로 하여 식 (18)을 이산 상태방정식으로 나타내면 식 (19)와 같이 얻어지게 된다. 식 (19)의 파라미터를 이용하여 관측기의 파라미터를 구해보면 시행착오법에 의해 관측기의 주파수 반응대역을 60Hz로 설정하여  $\sigma_z = \exp(-2\pi f_o T)$ 을 구하면  $\sigma_z = 0.6861$ 이다. 이 값들을 토대로 식 (8)에 대입하여 구한 게인값은 각각  $g_2=316$ ,  $g_4=0.0986$ 이다.

#### 나. 슬라이딩 모드 제어기 설계

모델 추종 슬라이딩 함수는 식 (13)으로부터 다음과 같이 선정하였다.

$$\sigma = \dot{x} + 2\zeta\omega_n x + \omega_n^2 \int_0^t (x - x_r) dt \quad (21)$$

여기서,  $\zeta$ 와  $\omega_n$ 은 각각 기준 모델의 감쇠계수와 고유진동수를 나타내며, 기준모델의 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (22)$$

제어 입력은 식 (15)로부터 다음과 같이 된다.

$$u = g^{-1} [-h\sigma - k \text{sat}(\sigma) + (\tau_m - 2\zeta\omega_n)\dot{x} - \omega_n^2(x - x_r) - \hat{\Psi}] \quad (23)$$

여기서, 섭동 추정값은 다음식과 같다.

$$\hat{\Psi} = [\dot{x} - \dot{x}_{-L}] / L + \tau_m \dot{x} - b_m u_{-L} \quad (24)$$

설계된 모델 추종을 위한 기준모델은 시스템 제원을 감안하여 고유진동수  $\omega_n$ 과 감쇠비  $\zeta$ 를 각각  $30\pi$  (rad/sec)와 0.8을 사용하였다. 슬라이딩 모드 제어기의 설계 변수  $h$ 와  $\eta$ 는 시행착오법에 의하여 속도센서 사용시에는 400과 0.005를 적용하였으며 관측기 사용시에는 250과 0.8을 적용하였다. 채터링을 완화시키기 위한 경계층의 두께와 관련된 변수  $\epsilon$ 은 0.1로 선정하였다.

### 5. 시뮬레이션

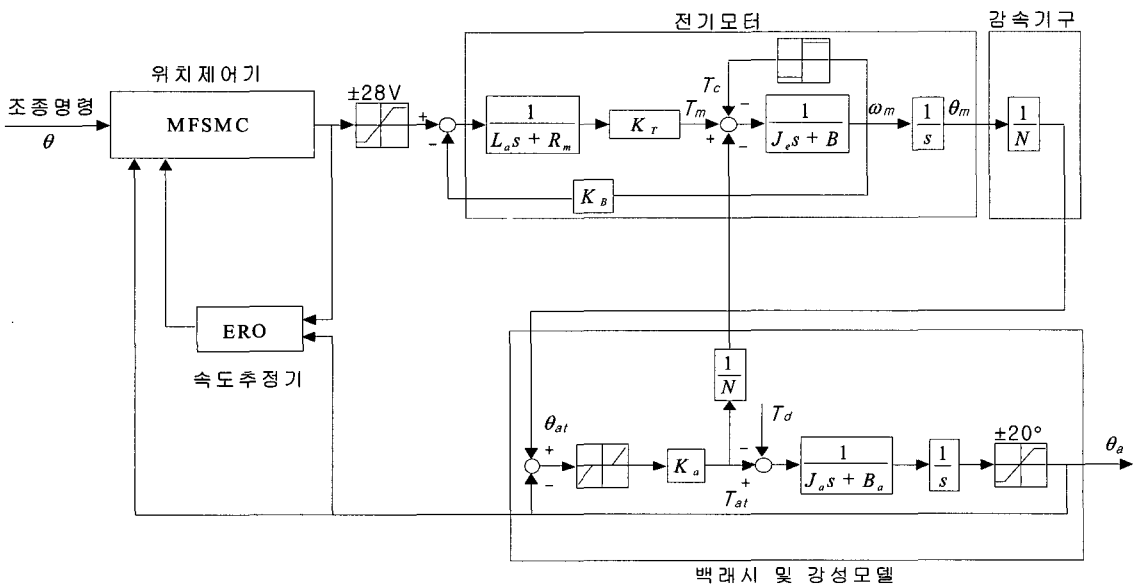
시뮬레이션은 MATLAB™/SIMULINK를 사용하여 수행하였다. 확장형 감소차수 관측기를 이용한

조종날개 구동장치의 블록선도는 그림 1과 같이 위치제어기로 사용된 MFSMC, 속도 추정을 위해 사용된 ERO, 선형화된 BLDC 모터, 감속기구, 백래시 (Backlash) 및 강성모델(Stiffness model)로 구성되어 있다.

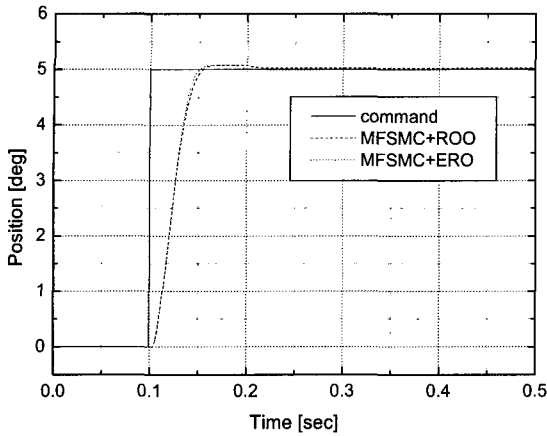
그림 2와 그림 3에는 일반적인 형태의 감소차수 관측기와 본 논문에 적용한 확장형 감소차수 관측기의 성능을 비교하기 위해 무부하 및 부하시 5° 계단응답에 대한 위치응답 및 속도추정 특성을 나타내었다. 무부하시의 위치응답 및 속도추정 특성은 비슷해 보이지만 그림 3과 같이 부하시 속도추정을 살펴보면 일반적인 감소차수 관측기에서는 관측오차가 발생하여 위치오차가 발생하는 반면에 확장형 감소차수 관측기는 무부하시와 거의 유사한 속도추정 성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

그림 4~8에서는 확장형 감소차수 관측기를 사용한 MFSMC의 강건성능을 평가하기 위하여 파라미터 변동에 대한 시뮬레이션을 수행하여 속도센서를 적용한 MFSMC 및 PID 제어기와 비교하였다.

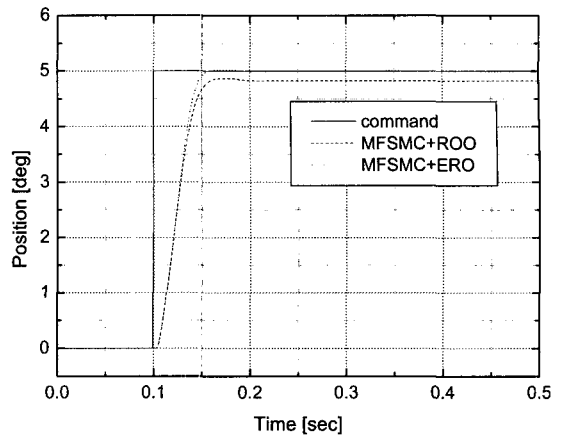
설계된 PID 제어기는 순수 미분으로 인한 문제점을 보완<sup>[8]</sup>하고 Anti-Windup 보상기<sup>[9]</sup>를 적용한 구조이며 설계치는 5도 명령에 대한 계단응답에 대해 시



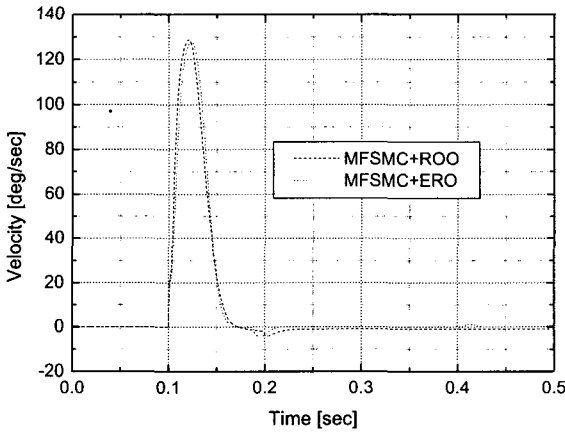
[그림 1] 조종날개 구동장치 블록선도



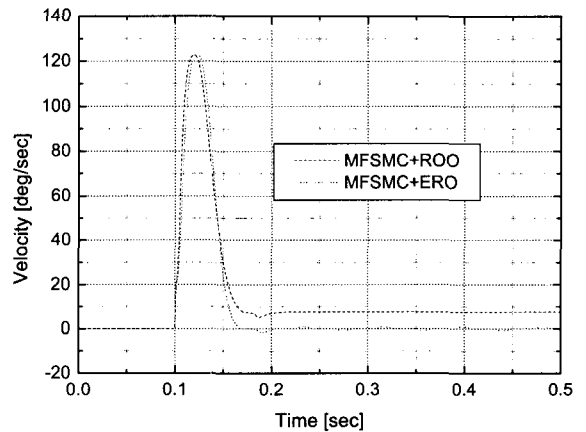
(a) 위치



(a) 위치



(b) 속도



(b) 속도

[그림 2] 관측기 응답 특성 비교 - 무부하시

[그림 3] 관측기 응답 특성 비교 - 부하시

행착오법을 이용하여  $K_p=16$ ,  $K_i=450$ ,  $K_d=0.01$ 로 설정하였다.

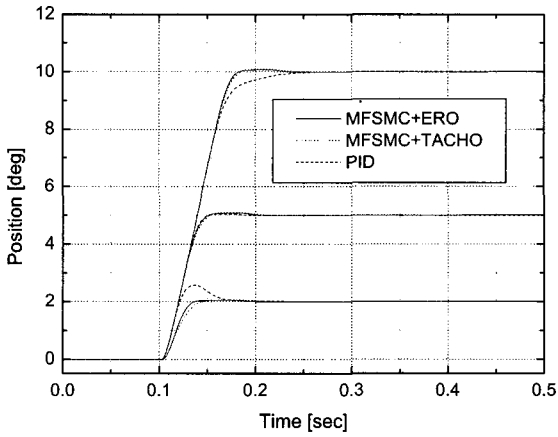
그림 4에는 무부하시 계단응답 특성을 나타내었다. 계단응답은 2°, 5°, 10°에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. PID 제어기는 5도 계단과 응답시험에서는 양호한 응답특성을 나타내지만 2도에서는 MFSMC에 비하여 큰 오버슈트(overshoot)가 발생하며 10도에서는 MFSMC에 비해 정착시간이 늦어짐을 알 수 있다. 확장형 감소차수 관측기를 적용한 MFSMC는 속도센서를 적용한 MFSMC과 거의 유사한 응답을 보여주고 있다.

그림 5에는 부하시 계단응답 특성을 나타내었다.

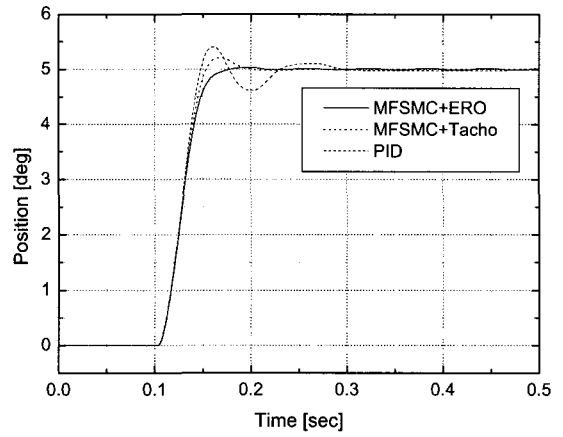
계단응답은 2°, 5°, 10°에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. PID제어기는 MFSMC에 비해 정착시간이 약간 늦음을 알 수 있다. 확장형 감소차수 관측기를 적용한 MFSMC와 속도센서를 적용한 MFSMC는 모두 양호한 응답을 보여주고 있다.

그림 6에는 모터저항을 2배 변동함에 따른 5도 계단응답 특성을 나타내었다. 확장형 감소차수 관측기와 속도센서를 적용한 MFSMC는 모터저항 변동에 미세한 응답특성의 변화를 나타내지만 PID 제어기 보다는 둔감함을 알 수 있다.

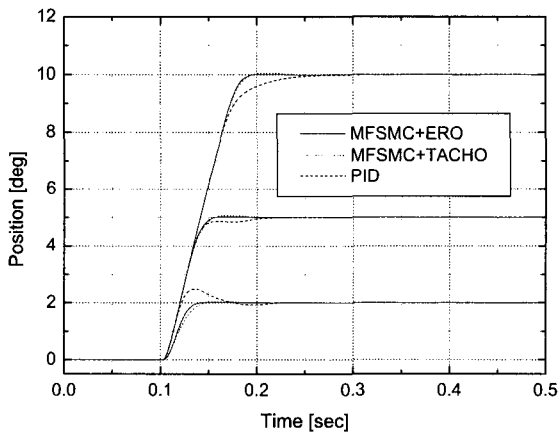
그림 7에는 관성부하를 2배 변동함에 따른 5도 계단응답 특성을 나타내었다. 모터저항 변동과 마찬가지로



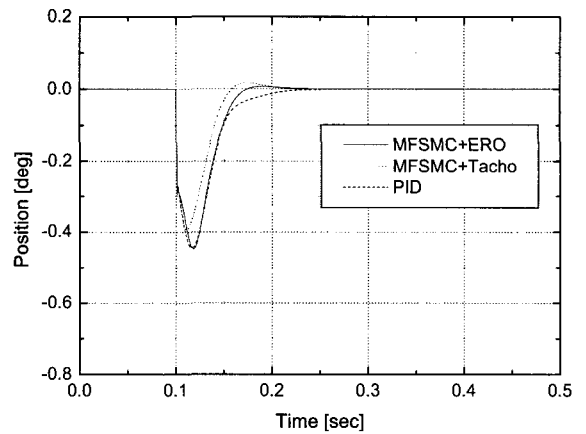
[그림 4] 계단 응답 특성 비교 - 무부하시



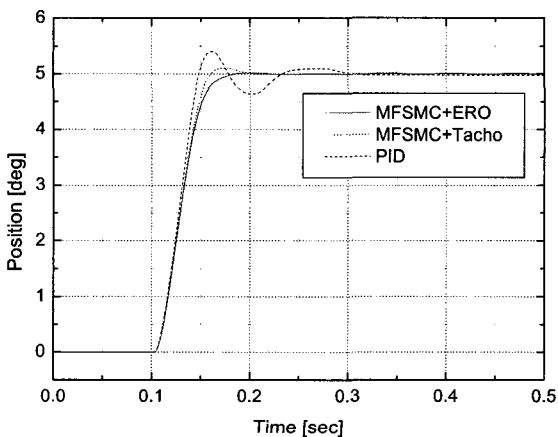
[그림 7] 관성부하 2배 변동에 따른 계단 응답



[그림 5] 계단 응답 특성 비교 - 부하시



[그림 8] 계단형 부하 외란 응답 특성(500lb-in,0.1초)



[그림 6] 모터저항 2배 변동에 따른 계단 응답 특성

지로 확장형 감소차수 관측기와 속도센서를 적용한 MFSMC는 관성부하 변동에 대하여 미세한 응답특성의 변화를 나타내지만 PID 제어기 보다는 응답특성이 양호함을 알 수 있다.

그림 8에는 부하가 순간적으로 인가될 경우 외란에 대한 강건성을 갖는 지를 알아보기 위하여 계단파의 부하외란(500lb-in)이 인가되었을 경우의 응답 특성을 나타내었다. 계단파 부하외란이 인가되는 경우에도 확장형 감소차수 관측기를 적용한 MFSMC는 속도센서를 적용한 MFSMC의 경우보다 위치변화가 조금 크게 나타나지만 PID 제어기를 사용한 경우보다 회복 능력이 빠름을 알 수 있었다.



## 6. 결론

모델추종 슬라이딩 모드 제어를 적용한 조종날개 구동장치의 속도추정을 위해 기존의 감소차수 관측기에 적분요소를 추가한 확장형 감소차수 관측기를 설계하였다. 확장형 감소차수 관측기는 무부하시 뿐만 아니라 부하시에서도 강건한 속도추정 성능을 나타내었다. 또한 파라미터 변화 및 부하외란에 대한 시뮬레이션을 통해 모델추종 슬라이딩 모드 제어가 모델 불확실성 및 외란에 대하여 둔감함을 입증하였으며 속도센서를 적용한 경우와 유사한 응답특성을 보임을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Slotine, J. J. E., and Sastry, S. S., "Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces with Applications to Robot Manipulators", International Journal of Control, Vol. 38-2, 1983, pp.465~492.
- [2] Doyle, J. C., "Synthesis of Robust Controllers and Filters", IEEE CDC, 1983.
- [3] Yousef-Toumi, K., and Ito, O., "A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics", ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Vol. 112, 1990, pp.133~142.
- [4] Elmali, H., Olgac, N., "Sliding Mode Control with Perturbation Estimation(SMCPE) : A New Approach", Intl. J. of Control, Vol. 56, No. 4, 1992, pp.923~941.
- [5] Moura J. T., Roy R. G., and Olgac N., "Sliding Mode Control With Perturbation Estimation (SMCPE) and Frequency Shaped Sliding Surfaces", Transaction of the ASME, Vol. 119, September, 1997, pp.584~588.
- [6] 신효필, 이종광, 강이석, "슬라이딩 모드를 가진 2 자유도 제어를 이용한 로봇 조작기의 끝점 위치 제어", 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제6권 제6호, 2000, pp.471~477.
- [7] Naumovic, M., and Stojic, M., "Velocity estimation in digital controlled dc servo drives", IECON '98, Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, Vol. 3, 1998, pp.1505~1508.
- [8] Coleman C. P., and Godbole D., "A Comparison of Robustness: fuzzy logic, PID, & Sliding Mode Control", IEEE World Congress on Computational Intelligence., Vol. 3, 1994, pp. 1654~1659.
- [9] Park Y. C., Chang W. W., and Roh H. S., "Anti-Jump Resonance Characteristics of Anti-Windup Compensator for Systems With a Saturating Actuator", KSME, Vol. 17, No. 6, 1993, pp.1342~1350.