

## 슬라이딩 모드 관측기와 제어를 이용한 서보시스템의 정밀제어

한성익\*, 공준희\*\*, 신대왕\*\*, 김종식\*\*\*

### Precise Control for Servo Systems Using Sliding Mode Observer and Controller

Seong Ik Han\*, Jun Hee Kong\*\*, Dae Wang Shin\*\*, Jong Shik Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

The effect of nonlinear friction in the low velocity is dominant in precise controlled mechanisms and it is difficult to model. This paper is concerned with the compensation for friction using the variable structure system approach as non-model based method. The problem of chattering in the sliding mode controller is suppressed by the implementation of the boundary layer concept. And the estimation for friction using sliding mode observer makes the upper bound of matched uncertainty reduced. Accordingly, the effect of chattering can be more suppressed. And the sliding surface is constructed by adding an integral component to the switching function that is made by using error dynamics. This sliding surface guarantees the good tracking performance. Experimental results for a XY table system show that the proposed method has a good performance especially in the low velocity.

**Key Words** : Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어), Sliding Mode Observer(슬라이딩 모드 관측기), XY table(XY 테이블)

#### 1. 서론

볼스크류 구동 시스템은 산업현장의 CNC 나 머시닝 센터(Machining Center) 뿐만 아니라 회로기판 제작에 사용되는 칩 마운터(Chip Mounter) 등의 시스템 구동장치에도 널리 사용되고 있다. 또한 레이저 절단기나 레이저 용접기 등의 서보 시스템에도 사용되는 등 그 적용범위가 아주 넓다. 최근의 고정도, 고정밀, 고속의 요구에 따라 이러한 시스템에 대한 정밀 제어는 필수적인 요소가 되었다.

이러한 서보시스템의 정밀한 위치제어를 하기 위해서는 본질적으로 존재하는 기계시스템에 대한 마찰 현상에 대한 이해와 적절한 제어 입력의 보상이 필수적이다.

특히 초정밀 구동을 필요로 하는 시스템의 경우, 고착 상태에서의 동적 거동과 저속에서의 Stribeck 현상과 같은 비선형 마찰현상에 대한 충분한 이해를 바탕으로 효과적인 제어전략이 필요하다. 마찰과 관련된 많은 연구에 의하면 stick-slip 과 Stribeck effect, limit cycle, friction lag, pre-sliding

\*\*\* 2002년 1월 4일 접수  
\* 순천제일대학 기계전기제어과  
\*\* 부산대학교 지능기계 대학원  
\*\*\* 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

변위, break-away 힘의 변화 등 저속에서 비선형을 나타내는 많은 현상들이 포착되었다. 이러한 현상들은 온도, 윤활 상태, 작동 시간, 부하의 크기, 작동 거리 등의 요소들에 의해 복합적으로 영향을 받으므로 마찰 모델의 특성을 파악하기가 무척 어렵다. Bliman 과 Dupont, Friedland, Hess, Canudas 등의 연구자들은 이러한 비선형 마찰을 실험적으로 그 현상을 규명하고, 이를 수식으로 표현하려는 시도를 하였다. 그리고 이러한 수식적 모델을 이용하여 마찰을 효과적으로 보상하였다<sup>(1-4)</sup>. 이와 같은 모델 기준(model-based) 접근법은 실제 시스템에 존재하는 마찰을 거의 정확하게 보상함으로써 적은 제어입력으로 시스템의 정밀 구동을 가능하게 하는 장점이 있다. 그러나 시스템을 운용함에 따라 마찰 파라미터들의 변동(variation)이 발생하게 되고, 이는 어려운 마찰의 실험적 규명 작업을 주기적으로 필요로 하게 된다. 이는 파라미터의 변동에 따르는 실험을 반복해야 하므로 강인성 측면에서 효과적이지 못하다.

본 논문에서는 파라미터 변동에 대한 강인성 및 마찰 보상을 적절하게 해 줄 수 있는 관측기를 이용한 슬라이딩 모드 제어를 설계하고 이를 XY 테이블 시스템에서 구현하였다. 본 논문에서 제안한 슬라이딩 모드 제어기법은 소위 안정한 슬라이딩 평면을 선정하고 플랜트의 상태를 이 슬라이딩 평면에 머물게 함으로써 플랜트 자체의 안정성과 관계없이 시스템을 제어할 수 있고, 또한 모델 불확실성 및 외란 등에 강인한 제어 기법이다. 그리고 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 마찰을 추정하였다. 슬라이딩 모드 관측기는 구조가 간단하면서도 스위칭 항에 의해 마찰을 효과적으로 추종함으로써, 슬라이딩 모드 제어가 가지고 있는 채터링의 영향을 억제시킨다.

결론적으로 본 연구를 통해, 비선형 마찰이 존재하는 시스템에 대하여 비모델 기준(nonmodel-based) 접근 방법으로 슬라이딩 모드 제어기법을 이용함으로써, 저속에서 서보시스템의 정밀 제어를 XY 테이블 시스템에서 실험적으로 구현하고자 한다.

## 2. 시스템 모델링

볼스크류 구동시스템에는 마찰 이외에 강력한 비선형 요소인 백래시(backlash)가 존재한다. 하지

만 최근에는 백래시를 무시할 수 있을 정도로 시스템의 정밀도가 많이 향상되었으므로 모델링 과정에서 백래시를 무시한다. 뿐만 아니라 회전체는 강체로 비틀림이 없으며 시스템에서 가장 효과적인 요소인 회전관성과 마찰을 제외한 모든 요소는 그 영향이 미비하므로 모델링 과정에서 생략하면 다음과 같은 기계시스템의 동적 방정식으로 모델링할 수 있다.

$$J_i \frac{dw_i}{dt} = \tau_{Mi} - T_{Fi} \quad (1)$$

여기서 첨자  $i$ 는  $x, y$  축을 의미하고  $J$ 는 회전관성이다. 그리고  $\tau_M$ 은 제어입력 토크,  $T_F$ 는 식(1)에서 표현된 시스템에 존재하는 마찰토크이다. 위 모델식에서 위치( $\theta$ )와 속도( $\omega$ )를 상태변수로 선정하고  $T_F$ 에서 선형의 점성마찰을 시스템 행렬에 포함시켜, 다음과 같은 상태공간 모델로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + f(x, t, u) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $x(t) \in R^n, u \in R^m, A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}, C \in R^{m \times n}$  이고  $f(x, t, u)$ 는 점성 마찰 이외의 마찰, 외란 및 파라미터 변동 등 시스템에 존재하는 정합 불확실성을 표현하는 미지의 함수로 상한치  $F$ 를 갖는다. 즉,  $\|f(x, t, u)\| \leq F$ 이다. 식(2)의 상태 공간 모델을 정규형태(regular form)로 변환하기 위해 다음과 같은 직교 변환행렬(orthogonal transformation matrix)을 가정한다.

$$TB = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $B_2$ 는  $m \times m$  비특이(non-singular) 행렬이다. 그리고  $z = Tx$ 로 두면 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{z}_1(t) = TAT^T z(t) + TBu(t) \quad (4)$$

여기서  $z^T = [z_1^T \quad z_2^T]$ ,  $z_1 \in R^{n-m}, z_2 \in R^m$ 로 두면 다음과 같은 정규형태로 나타낼 수 있다.

$$\dot{z}_1(t) = A_{11}z_1(t) + A_{12}z_2(t) \quad (5)$$

$$\dot{z}_2(t) = A_{21}z_1(t) + A_{22}z_2(t) + B_2u(t) \quad (6)$$

여기서  $TAT^T = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ ,  $CT^T = [C_1 \ C_2]$  이다.

### 3. 제어기 설계

#### 3.1 슬라이딩 모드 제어기 설계

슬라이딩 모드 제어시스템 설계에서 가장 우선되는 작업은 제어 대상 시스템에 대해 적절하고 안정한 슬라이딩 평면을 선정하는 것이다. 서보시스템의 경우 일반적으로 오차 동역학을 이용하여 다음과 같이 슬라이딩 함수를 선정한다<sup>(5, 6, 7, 8)</sup>.

$$s(t) = \Lambda e + \frac{d}{dt}e \quad (7)$$

여기서  $e$ 는 기준입력과 출력신호와 차이이고  $\Lambda$ 는 양의 상수 행렬이다. 본 연구에서는 서보시스템의 추종성능을 더욱 향상시키기 위하여 식(7)의 슬라이딩 함수에 적분요소를 추가하여 다음과 같이 슬라이딩 평면을 선정하였다<sup>(9)</sup>.

$$s(t) = \Lambda_1 e + \frac{d}{dt}e + \Lambda_2 \int_0^t e d\tau = 0 \quad (8)$$

여기서,  $\Lambda_1$ ,  $\Lambda_2$ 는 임의의 양의 상수 행렬이다. 제어입력을 구성할 슬라이딩 조건 (reaching condition)은 직접 절환법(direct switching method)에 의해 다음과 같이 선정한다<sup>(10)</sup>.

$$s^T \dot{s} = -s^T Hs - s^T K \operatorname{sgn}(s) < 0 \quad (9)$$

여기서  $K$ 는 양의 반 한정(semi-positive definite) 대각요소를 갖는 대각(diagonal) 행렬이고,  $H$ 는 양의 반한정으로 슬라이딩 모드 도달 시간과 관련된 행렬로 전통적으로 그 값은 0이다. 이 때의 슬라이딩 조건은 다음과 같다.

$$s^T \dot{s} = -s^T K \operatorname{sgn}(s) < 0 \quad (10)$$

슬라이딩 조건 (10)을 만족하는 제어입력은 다음과 같다.

$$u = u_{eq} + B_2^{-1}K \operatorname{sgn}(s) \quad (11)$$

여기서 두 번째 항은 스위칭 제어입력이다. 그리고 첫 번째 항은 등가 제어입력으로 슬라이딩 모드 상에서 정의되는 제어입력이다. 따라서 등가제어입력은  $\dot{s} = 0$ 이 성립하도록 계산되어진다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \Lambda_1 \frac{d}{dt}e + \Lambda_2 e + \frac{d^2}{dt^2}\theta_d - A_{21}z_1 - A_{22}z_2 - B_2u \\ &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $\theta_d$ 는 기준입력이다. 등가제어입력은 다음과 같이 표현된다.

$$u_{eq} = B_2^{-1}(\Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_2 e + \ddot{\theta}_d - A_{21}z_1 - A_{22}z_2) \quad (13)$$

그리고 슬라이딩 조건 (9)를 만족하는 제어입력은 다음과 같다.

$$u = u_{eq} + B_2^{-1}(Hs + K \operatorname{sgn}(s)) \quad (14)$$

슬라이딩 모드 제어기의 제어입력은 슬라이딩 모드를 가로지르는 강력한 변화로 인해 모델링되지 않은 동역학을 여기시켜 채터링을 발생시키는 중대한 단점을 가진다. 이러한 채터링을 억제하기 위해 경계층 개념을 이용하여 제어입력을 다음과 같이 구성한다.

$$u = u_{eq} + B_2^{-1}(Hs + K \operatorname{sat}(s / \Phi)) \quad (15)$$

여기서  $\operatorname{sat}(x) = \begin{cases} x & \text{if } |x| < I \\ \operatorname{sgn}(x) & \text{if } |x| \geq I \end{cases}$  이고  $\Phi$ 는 경계층 두께이다. 따라서 경계층 바깥에서의 제어입력은 식 (14)와 동일하다.

#### 3.2 슬라이딩 모드 관측기 설계

식(1)에서 제어입력항 대신에 마찰을 제외한

모든 외부 힘을  $u_f$ 로 표현하여 동적 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_i \frac{dw_i}{dt} = u_{fi} - T_{Fi} \quad (16)$$

각속도는 각변위의 시간 미분( $w_i = \dot{\theta}_i$ )이라고 가정하고 침자를 생략하여 윗 식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{w} = (u_f - T_F) / J \quad (17)$$

일반적인 관측기의 원리와 마찬가지로 입력과 출력 정보를 이용해서 마찰토크를 추정하려고 한다. 마찰 관측기는 Utkin 의 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 표현하면 다음과 같다<sup>(8,11)</sup>.

$$\dot{\hat{T}}_F = -L\sigma \quad (18)$$

$$\dot{\hat{\xi}} = (-\hat{T}_F + u_f + \sigma) / J \quad (19)$$

여기서  $\xi$ 는  $w$ 의 출력값이고  $L$ 은 관측기 이득치이며  $\sigma$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma = N \operatorname{sgn}(e_\xi), \quad N > 0 \quad (20)$$

여기서  $e_\xi = \xi - \hat{\xi}$ 이고  $N$ 은 양의 상수이다. 관측기 동역학에서 스위칭 항은 시스템의 고주파 성분을 여기시킬 수 있으므로 시그모이드 함수를 이용하여 채터링 현상을 억제한다.

$$\sigma = N \tanh(e_\xi / \Phi_{e_\xi}), \quad N > 0 \quad (21)$$

$e_\xi$ 에 대한 경계층 두께  $\Phi_{e_\xi}$ 가 클수록 채터링 영향은 줄어들 수 있다. 하지만  $e_\xi$ 의 수렴을 위해 다음 조건식을 만족하도록 파라미터들을 선정한다.

$$\frac{\Phi_{e_\xi}}{N} \ll \frac{1}{L} \quad (22)$$

그리고 모델기준 피드 포워드 마찰 보상을 위해

마찰을 제외한 모든 외부 힘의 형태를 다음과 같이 표현한다.

$$u_f = u + \hat{T}_F \quad (23)$$

식 (2)의  $f(x,t,u)$ 에서 중요한 불확실성 요소인 마찰을 추정함으로써 상한치  $F$ 의 크기를 줄일 수 있으므로 제어입력 스위칭 항에 의한 채터링 영향은 더욱 줄일 수 있다. Fig. 1은 슬라이딩 모드 관측기를 갖는 슬라이딩 모드 제어시스템의 개략도이다.

#### 4. 실험 및 검토

Fig. 2는 실험에 사용된 XY 테이블 시스템의 사진이다. 각 축에는 볼 스크류와 LM 가이드가 있고, 분해능이 1000 pulse/rev 인 회전증분형 엔코더가 부착된 DC servo 모터가 볼 스크류를 구동하게 된다. 제어기는 PC 상에서 Mathwork 사의 Simulink 를 이용하여 구현되었다. step size 는 1msec 이고, Runge-Kutta 방식으로 계산되었다. 구현된 제어기는 dSPACE 사 DSP1102 보드 내의 TI 사 TMS320C31 칩에 로딩된다. 로딩된 제어기의 제어 신호는 DSP 보드와 인터페이스 요소를 통해 모터 드라이버에 전달하게 되어 모터를 구동하게 된다. 실험 도중의 설계 파라미터의 튜닝 및 실험 결과는 dSPACE 사 Control Desk 를 통해 획득되었다. Table 1은 XY 테이블의 시스템의 파라미터를 나타낸다.

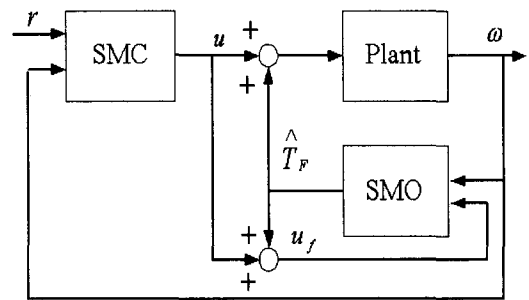


Fig. 1 Schematic diagram of the SMC system with sliding mode observer

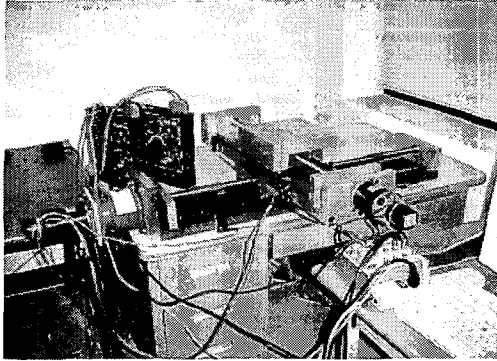


Fig. 2 Photograph of the XY table system

Table 1 System parameters of the XY-table

Parameter	Moment of inertia ( $kgf \cdot cm \cdot sec^2 / rad$ )	Reduction rate	Amp gain (A/V)	Torque constant ( $kgf \cdot cm / A$ )
X-axis	0.250	1/20	2.727	2.27
Y-axis	0.135	1/1	3.258	2.27

원 궤적의 기준 입력을 XY 테이블 시스템에 인가하여, 본 연구를 통해 설계된 제어시스템의 궤적 성능(contouring performance)을 검토하기로 한다. 기준 입력은 31.415 초 동안 반지름이 1mm 인 원 궤적으로 시스템에 주어진다. 검토 대상 제어 시스템은 전통적 슬라이딩 모드 제어기(SMC), 절환 함수에 적분 요소가 추가된 적분형 슬라이딩 모드 제어기(ISMC) 그리고 여기에 경계층 개념이 추가된 적분형 경계층 슬라이딩 모드 제어기(ISMCB), 마지막으로 슬라이딩모드 관측기가 추가된 제어기(ISMCB/SMO)에 대해 차례로 살펴 보기로 한다. 설계 파라미터는 동일하게 구성되었다. 즉, SMC, ISMC, ISMCB, ISMCB/SMO 의 공통된 설계 파라미터들의 값은 동일하며 ISMCB/SMO 의 파라미터는 다음과 같다.

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} 30 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad \Lambda_2 = \begin{bmatrix} 60 & 0 \\ 0 & 60 \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix},$$

$$H = \Phi^{-1}K = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 0.05 \end{bmatrix}, \quad \Phi_{e\xi} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

#### 4.1 전통적 슬라이딩 모드 제어기(SMC)

Fig. 3 은 SMC 시스템의 궤적 성능을 나타내는 결과이다. 점선은 기준입력이고, 실선이 출력이다. 출력이 X 축으로는 추종하고 있으나, Y 축은 거의 추종되지 않는다. 이는 그림 5 의 Y 축 오차를 통해 더 잘 알 수 있다. 그리고 그림 4 의 X 축 출력 오차를 통해 마찰 현상을 확인 할 수 있다. 즉, 초기에 stiction 의 영향으로 오차의 크기가 크게 증가했다가 감소하게 된다. 여기서 오차가 감소하는 이유는, Stribeck 속도 이하에서 마찰의 크기가 속도의 증가에 따라 감소하는 현상에 기인한 것이다. 그리고 기준 입력이 방향전환하게 되면서, 다시 stiction 의 영향으로 음의 방향으로 마찰의 크기가 증가했다가 다시 감소하는 현상을 되풀이하는 것도 같은 원인으로 해석된다. 즉, X 축 출력 오차가 저속에서의 비선형 마찰 현상을 그대로 반영하는 것은, 저속에서의 마찰을 적절히 보상하지 못함을 말해주고 있다.

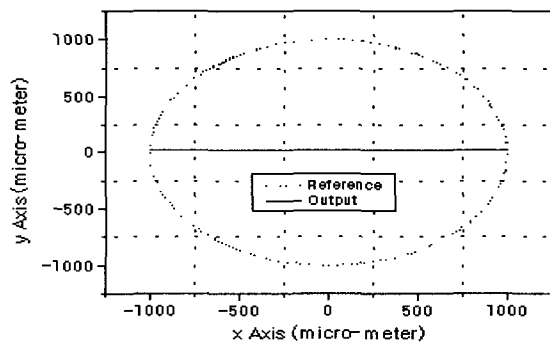


Fig. 3 Reference input and output for the conventional SMC system without observer

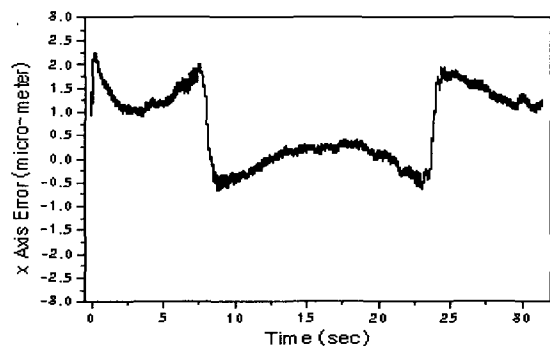


Fig. 4 X-axis tracking error of the conventional SMC system without observer

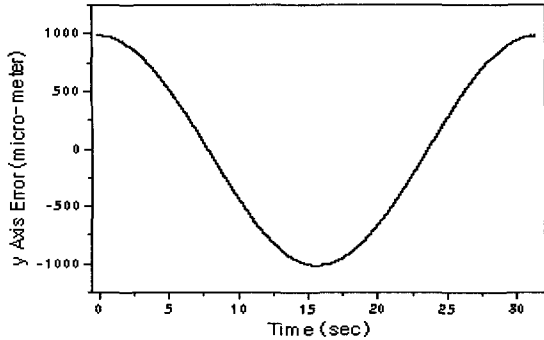


Fig. 5 Y-axis tracking error of the conventional SMC system without observer

#### 4.2 적분형 슬라이딩 모드 제어기 (ISMC)

Fig. 6 은 ISMC 시스템의 궤적 성능을 나타내고 있다. 절환 함수에 적분 요소가 추가된 결과, SMC 시스템의 성능을 훨씬 상회하는 추종 성능을 확인할 수 있다. 초기 위치에서 출발하여, 원 궤적에 다 달았을 때, Y 축에 일종의 오버슈트가

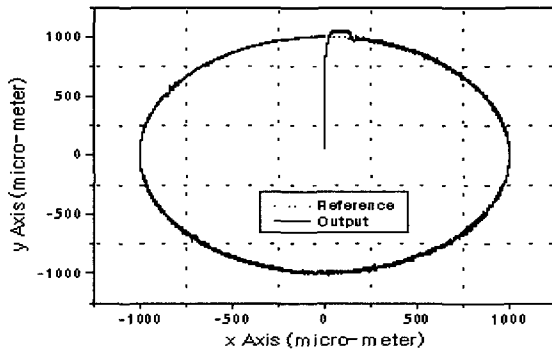


Fig. 6 Reference input and output for the ISMC system without observer

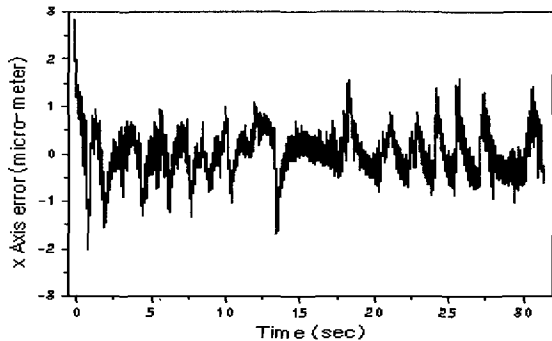


Fig. 7 X-axis tracking error of the ISMC system without observer

발생하여 추종 성능이 좋지 못한 현상을 볼 수 있고, Fig. 7 과 Fig. 8 의 출력 오차를 통해 Y 축 오차가 초기 2 초 이후 최대 크기가  $40 \mu\text{m}$  정도로, X 축 최대 크기  $2 \mu\text{m}$  에 비해 추종 성능이 상당히 좋지 못한 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9 와 Fig. 10 의 제어 입력의 결과를 통해 채터링 현상이 두드러짐을 지적할 수 있다.

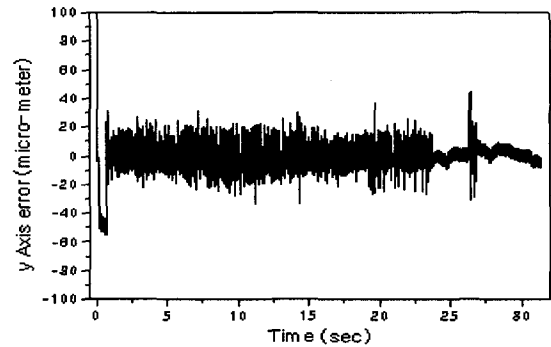


Fig. 8 Y-axis tracking error of the ISMC system without observer

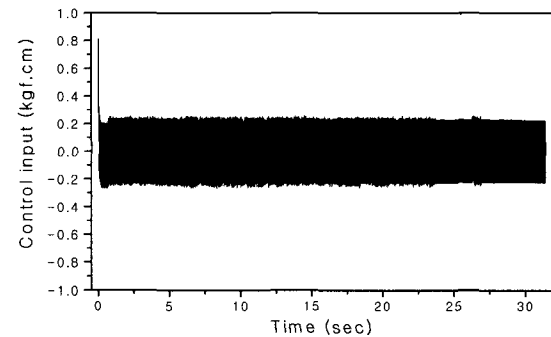


Fig. 9 X-axis control input of the ISMC system

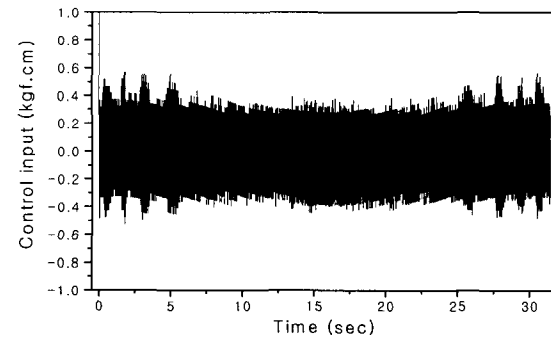


Fig. 10 Y-axis control input of the ISMC system

### 4.3 적분형 경계층 슬라이딩 모드 제어기 (ISMCB)

Fig. 11 은 ISMCB 시스템의 궤적 성능을 도식화한 것이다. 이전의 SMC 시스템 및 ISMC 시스템의 출력보다 많이 향상된 결과를 볼 수 있다. 이는 제어입력 항에 연속항과 경계층 개념을 이용한 스위칭 항이 추가된 결과로, 기준입력에 대해 제어가 적절히 입력을 인가함을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 12 와 Fig. 13 의 출력 오차 및 Fig. 14, Fig. 15 의 제어 입력의 결과를 통해 ISMC 시스템의 결과에 비해 채터링 현상이 많이 억제된 것을 확인할 수 있다. 특히 X 축은 적은 제어입력으로 좋은 추종성을 획득했음을 알 수 있다. 그러나 원 궤적의 초기 현상 및 중반 이후 현상이 기준 입력과 약간 차이가 나는 것을 볼 수 있으며, Y 축 초기 2 초 이후 최대 오차의 크기는 ISMC 시스템의 결과와 비슷한 크기인  $40 \mu\text{m}$  정도로, 여전히 Y 축의 추종 성능이 부족함을 알 수 있다.

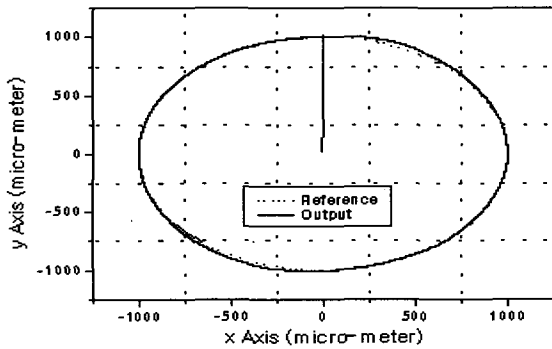


Fig. 11 Reference input and output for the ISMCB system without observer

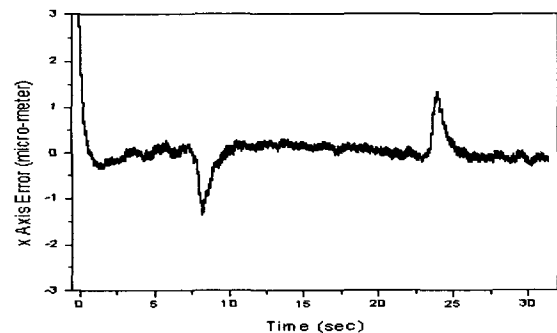


Fig. 12 X-axis tracking error of the ISMCB system without observer

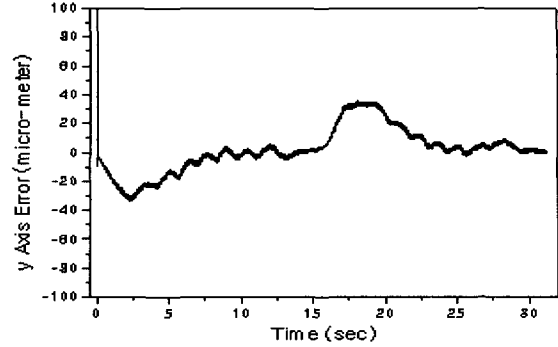


Fig. 13 Y-axis tracking error of the ISMCB system without observer

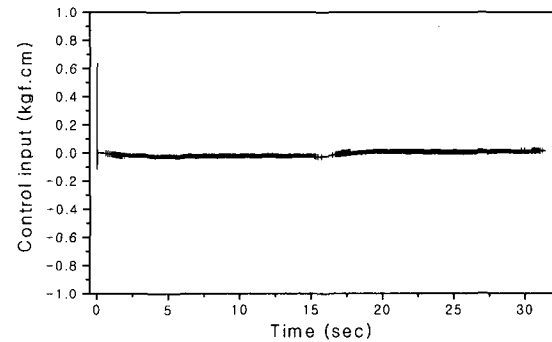


Fig. 14 X-axis control input of the ISMCB system

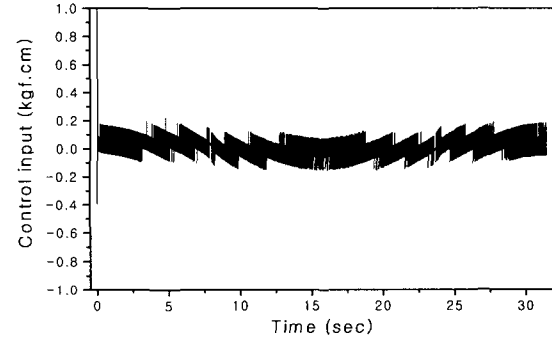


Fig. 15 Y-axis control input of the ISMCB system

### 4.4 적분형 경계층 슬라이딩 모드 제어기 + 슬라이딩 모드 관측기 (ISMCB/SMO)

Fig. 16 은 ISMCB/SMO 시스템의 궤적 성능을 나타내는 결과이다. ISMCB 시스템의 결과처럼 큰 오차 없이 잘 추종하고 있음을 볼 수 있다. 이는 슬라이딩 모드 관측기의 마찰 추종 및 보상이 적절히 수행되었음을 말하며, 채터링 현상 역시 더

속 저하되었음을 Fig. 17 과 Fig. 18 의 출력 오차 및 Fig. 19, 20 의 제어 입력을 통해 확인할 수 있다. 특히 Fig. 18 의 Y 축 출력 오차를 통해, ISMC, ISCMB 시스템의 초기 2 초 이후 최대 크기인 40  $\mu\text{m}$  보다 1/2 정도 줄어든 성과를 얻을 수 있었다.

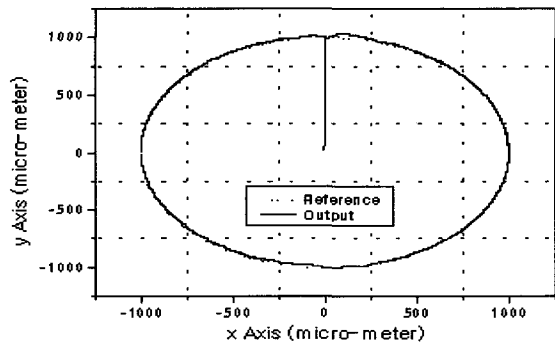


Fig. 16 Reference input and output for the ISMCB/SMO system

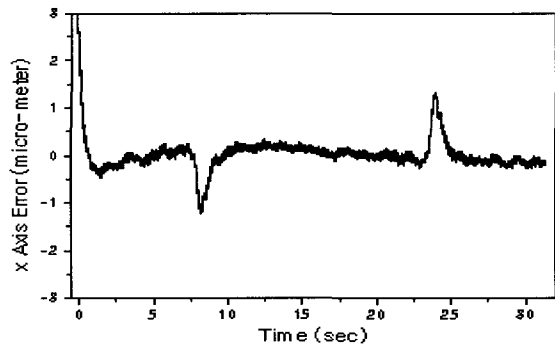


Fig. 17 X-axis tracking error of the ISMCB/SMO system

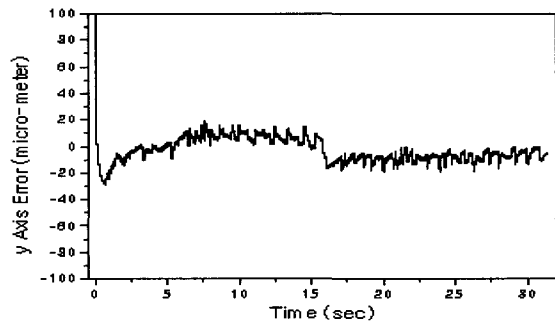


Fig. 18 Y-axis tracking error of the ISMCB/SMO system

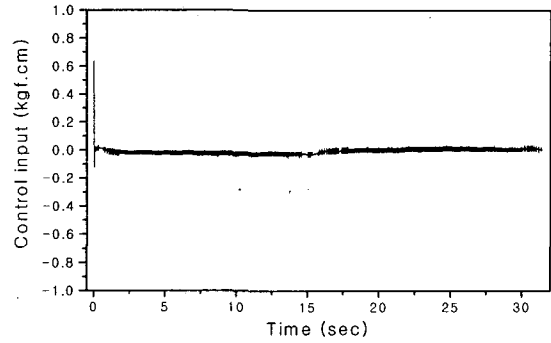


Fig. 19 X-axis control input of the ISMCB/SMO system

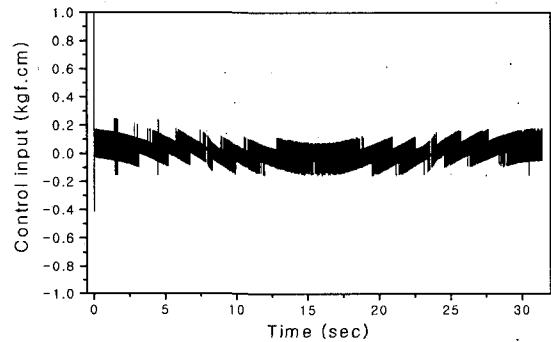


Fig. 20 Y-axis control input of the ISMCB/SMO system

## 5. 결론

슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 비모델 기준 접근법으로 마찰이 존재하는 시스템의 정밀 제어를 XY 테이블 시스템에서 실험을 통하여 구현하였다. 슬라이딩모드 제어입력을 경계층 개념을 이용한 입력과 연속형의 결합으로 구성함으로써, 슬라이딩 모드 제어기의 구현에서 문제가 되는 채터링 문제를 억제하고 동시에 성능을 향상시킬 수 있었다. 또한 슬라이딩 모드 관측기를 이용하여 마찰을 추종, 보상함으로써, 시스템 정합 불확실성의 크기를 줄였다. 결과적으로 채터링 현상을 더욱 더 억제시킬 수 있었다. 그리고 절환 함수에 적분 요소를 추가하여 슬라이딩 평면을 선정함으로써 서보시스템의 추종 성능을 크게 향상시킬 수 있었다.

추후 연구과제로는 XY 테이블 시스템과 같은 다축 시스템에서, 보다 체계적인 다변수 시스템의 접근이 필요하다. 즉, 다변수 시스템에 대한 적절한 슬라이딩 평면의 선정 문제가 절실하며, 또는



기존의 다변수 제어기법과 슬라이딩 모드 제어기법을 결합하는 연구가 필요하다. 그리고 채터링 문제를 실험에서 실제적이고, 효과적으로 억제할 수 있는 연구가 필요하다.

Optimization, Springer-Verlag, 1992.

### 참고문헌

1. P. Dahl, "A Solid Friction Model," Technical Report TOR-0158(3107-18)-1, The Aerospace Corporation, El Segundo, CA, 1968.
2. D. P. Hess and A. Soom, "Friction at a lubricated line contact operating at oscillating sliding velocities," *Journal of Tribology*, Vol. 112 pp. 147~152, 1990.
3. P. A. Bliman, "Mathematical Study of the Dahl's Friction Model," *European J. Mechanics. A/Solids*, Vol. 11, No. 6, pp. 835~848, 1992.
4. Canudas de Wit C., H. Olsson, K. J. Aström and P. Lischinsky, "A New Model for Control of Systems with Friction," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 40, No. 3, pp. 419~425, 1995.
5. Raymond A. DeCarlo, Stanislaw H. Zak and Gregory P. Matthews, "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial," *proc. IEEE*, Vol. 76, No. 3, pp. 212~232, 1998.
6. K. Erbatur, M. O. Kaynak, and A. Sabanovic, "A Study of Robustness Property of Sliding-Mode Controllers: A Novel Design and Experimental Investigation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 46, No. 5, pp. 1012~1018, 1999.
7. Zhang D. Q. and Panda S. K., "Chattering-Free and Fast Response Sliding Mode Controller," *IEE proc. Contr. Theory Appl.*, Vol. 146, No. 2, pp. 171~177, 1999.
8. Ha Q. P, Bonchis A., Rye D. C., and Durrant-Whyte H. F., "Variable Structure Systems Approach to Friction Estimation and Compensation," *IEEE proc. Robotics & Automation*, pp. 3543~3548, 2000.
9. T. L. Chern and Y. C. Wu, "Design of Integral Variable Structure Controller and Application to Electrohydraulic Velocity Servosystems," *IEE pro.-D*, Vol. 138, No. 5, pp. 439~445, 1991.
10. J. J. E. Slotine and Li Weiping, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall. Inc., 1991.
11. V. I. Utkin, *Sliding Models in Control and*