

# 슬라이딩모드 제어기를 이용한 AC 서보 모터의 위치제어

천정우\*, 최승복#, 송현정\*, 함준호\*

## Position Control of AC Servo Motor Using Sliding Mode Controller

Jung-Woo Cheon\*, Seung-Bok Choi#, Hyun-Jeong Song\* and Joon-Ho Ham\*

### ABSTRACT

The conventional sliding mode control(SMC) technique requires a prior knowledge of the upperbounds of external disturbance to guarantee a robust control performance. This, however, may not be easy to identity in practice. This paper presents a new methodology, sliding mode control with disturbance estimator(SMCDE), which offers a robust control performance without a prior knowledge of the upperbounds. The proposed technique is featured by an integrated average value of the imposed disturbance over a certain period. The proposed technique is applied to the position control of AC servo motor, and experimental results are compared between the conventional and proposed schemes.

**Key Words** : Sliding Mode Control (슬라이딩 모드 제어), Disturbance Estimation (외란 추정), Robust Control (강건 제어), AC Servo Motor (AC 서보 모터)

### 1. 서론

로봇을 비롯한 각종 시스템의 위치제어에 많이 사용되고 있는 AC 서보 모터는 감속기와 연계된 마찰을 비롯하여 여러 형태의 외란을 받고 있다.<sup>1,2</sup> 외란에 대한 정확한 정보와 정교한 모델이 확보된다면 고전적인 PID 제어기의 사용으로 우수한 제어성능을 얻을 수 있지만<sup>3,4</sup> 실제적 구현은 그리 용이하지 않다. 따라서 외란 및 변수 변화에 강건한 슬라이딩 모드 제어(sliding mode control : SMC) 기법이 유용하게 사용되고 있다.<sup>5-8</sup> 그러나 대부분의 SMC 설계에 있어서 불확실성에 대한 한계를 미리 알고 있다고 가정하기 때문에 과도한 설계가 이루어 지고 있으며, 이로 인한 떨림

(chattering) 현상 증가로 종종 시스템 제어 성능의 급격한 저하를 초래한다. 따라서 이를 극복 하고자 불확실성을 예측하기 위한 여러 기법들이 제안되고 있다. 특히 제어입력과 직접 연계되어 있는 외란의 예측을 위하여 여러 종류의 외란 관측기(혹은 추정기)가 사용되고 있다.<sup>9-13</sup>

Kozek<sup>9</sup> 등은 SMC 에 선형 외란 관측기를 추가하여 고속 전자기 시스템의 강건제어를 수행하였고, Lu 와 Chen<sup>10</sup> 은 시스템 모델 불확실성과 외란의 예측을 위한 섭동 관측기(perturbation estimator)를 제안하여 전자기 부상시스템의 강건제어를 수행하였으며, Liu 와 Peng<sup>11</sup> 은 시스템 불확실성과 변수변화를 외란으로 간주하여 이를 예측하기 위한 관측기를 설계한 후 로봇팔 운동제어에 적용하였

접수일: 2003년 2월 11일; 게재승인일: 2004년 1월 9일  
\* 인하대학교 대학원 기계공학과  
# 교신저자, 인하대학교 기계공학과  
Email : seungbok@inha.ac.kr, Tel. (032)860-7319

다. 한편 Elmalı 와 Olgac<sup>8,9</sup> 은 모델링 불확실성과 외란의 예측을 위하여 슬라이딩 서피스의 동적운동을 고려한 SMCPE(sliding mode control with perturbation estimation)를 제안하여 효과적인 로봇의 강건제어를 수행하였다. 본 연구에서 제안한 외란 예측방법은 Elmalı 와 Olgac<sup>12,13</sup> 이 제안한 Sliding Mode Control with Perturbation Estimation(SMCPE)와 그 형태가 매우 유사하나 예측기법이 상이하다. SMCPE 기법은 시스템의 상태방정식에서 외란(혹은 perturbation)을 제외하곤 모든 항을 알고 있다고 가정한 후 간단한 대수 연산을 통하여 예측하는 방법으로서 다른 외란 관측 방법들과 비교하여 관측값에 대한 수렴시간과 위상차가 거의 없어 비교적 우수한 성능을 나타내고 있다. 그러나 SMCPE 는 이론 전개 과정에서 몇 가지 가정과 특징 때문에 본 연구에서 제안하는 방법에 비해 상대적인 단점이 존재한다. 예를 들어, SMCPE 는 외란을 계산할 때 시스템의 상태방정식에서 미분항을 알아야 하기 때문에 이로 인한 오차발생이 불가피하다. 또한 시스템 상태방정식의 미분항은 차수가 높을수록 잡음(noise)이 많아지고 불연속적인 값이 나오는 경향이 있어 오차가 더욱 더 증가하게 된다. 물론 필터를 사용하여 이런 문제점을 해결 할 수 있겠지만 이로 인한 또다른 형태의 제어성능 저하가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 해결하기 위하여 상태방정식의 미분항 대신 일정기간 동안의 외란 적분 평균값을 사용하여 외란을 정확하게 예측하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 외란 추정기의 성능을 입증하기 위하여 외란 토크를 받고 있는 AC 서보 모터의 위치제어를 실험적으로 수행하였으며, 그 결과를 시간영역에서 제시하였다.

## 2. 모델링 및 제어기 설계

본 연구에 사용한 AC 서보 모터는 다음과 같이 모델링 될 수 있다.<sup>14</sup>

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} T_m(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} d(t) \quad (1)$$

여기서  $J$  는 모터의 관성 모멘트,  $B$  는 모터에 의한 유효 점성감쇠 계수,  $T_m(t)$  은 입력 토크, 그

리고  $d(t)$  는 마찰을 비롯한 외란을 나타낸다. 외란 추정기를 갖는 슬라이딩 모드 제어기(SMCDE)를 설계하기위해 식(1)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{B}{J} \dot{x}_1(t) + \frac{1}{J} u(t) + d(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $u(t)$  는 모터에 인가되는 토크이고,  $x_1(t)$  와  $x_2(t)$  는 각각 모터의 각 변위와 각 속도를 나타낸다. 먼저 일반적인 슬라이딩 모드 제어기를 구성하기 위해 다음과 같이 오차를 정의한다.

$$\begin{aligned} e_1(t) &= x_d(t) - x_1(t) \\ e_2(t) &= \dot{x}_d(t) - x_2(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $x_d(t)$  는 요구 각변위를 나타낸다. 식 (3)으로 정의되는 오차 상태 공간에서 슬라이딩 변수와 슬라이딩 서피스를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$s(t) = c_1 e_1(t) + e_2(t) = 0, \quad c_1 > 0 \quad (4)$$

여기서  $c_1$  은 슬라이딩 서피스의 기울기를 나타낸다. 따라서  $s(t)$  의 동적 모델은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= c_1 \dot{e}_1(t) + \dot{e}_2(t) \\ &= c_1 \dot{e}_1(t) + \ddot{x}_d(t) + \frac{B}{J} x_2(t) - \frac{1}{J} u(t) - d(t) \end{aligned} \quad (5)$$

슬라이딩 모드 존재조건  $s(t)\dot{s}(t) < 0$  이 만족하도록  $u(t)$  를 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(t) &= J(u_{eq} + k \operatorname{sgn}(s(t))), \quad k > |d(t)| \\ u_{eq} &= c_1 \dot{e}_1(t) + \ddot{x}_d(t) + \frac{B}{J} x_2(t) \end{aligned} \quad (6)$$

상기 식에서  $k$  는 불연속 제어게인을 나타낸다. 식 (6)에서 알 수 있듯이 제어 게인  $k$  의 선택을 위해서는 외란  $d(t)$  의 한계치를 미리 알아야 하

며, 이에 대한 정보가 미비할 때에는 매우 큰  $k$  값을 사용하여 슬라이딩모드 존재조건이 만족되도록 한다. 그러나 이 경우 제어 시스템의 과잉설계가 이루어져 입력의 크기가 증가하게 되며, 이에 따라 떨림 현상이 증가하여 시스템 성능에 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 외란  $d(t)$  에 대한 정확한 예측이 필요하게 된다.

다음은 본 연구에서 제안된 SMCDE 를 설계하기 위해 외란 예측항이 포함된  $s(t)$  의 동적 모델을 다음과 같이 구성한다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= c_1 \dot{e}_1(t) + \dot{e}_2(t) \\ &= c_1 \dot{e}_1(t) + \ddot{x}_d(t) + \frac{B}{J} x_2(t) - \\ &\quad u_{eq}(t) - k \operatorname{sgn}(s(t)) + d_{estimated}(t) - d(t) \end{aligned} \quad (7)$$

상기 식을 이용하여 임의의 시간  $T - \delta$  에서  $T$  동안 적분한 후 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_{T-\delta}^T d(t) dt &= -\{s(T) - s(T - \delta)\} - \\ &\quad \delta \cdot k \operatorname{sgn}(s(T - \delta)) + \delta \cdot d_{estimated}(T - \delta) + \\ &\quad \int_{T-\delta}^T \left( c_1 \dot{e}_1(t) + \ddot{x}_d(t) + \frac{B}{J} x_2(t) - u_{eq}(T - \delta) \right) dt \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서  $\delta$  는 외란 관측을 위한 샘플링 시간이며, 이 크기에 따라 외란 관측 성능과 제어 성능이 영향을 받는다. 일반적으로 식(8)의  $d(t)$  를 정확히 알아내는 것은 매우 힘들며, 이를 알 수 있다고 하여도  $T - \delta$  에서  $T$  사이에 어떤 값을 사용하여 외란 추정에 사용해야 하는가에 대한 문제가 남는다. 따라서 아래의 조건을 만족하는  $d_{average}(T)$  를 정의한다.

$$\int_{T-\delta}^T d_{average}(T) dt = \int_{T-\delta}^T d(t) dt \quad (9)$$

$T - \delta$  에서  $T$  시간 동안의  $d(t)$  의 적분값과  $d_{average}(T)$  의 적분값은 같다고 할 수 있다. 따라서, 외란 평균값은 다음과 같다.

$$d_{average}(T) = \int_{T-\delta}^T d(t) dt / \delta \quad (10)$$

식 (10)을 식(8)의 좌변 항에 대입하여 정리하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} d_{average}(T) &= -\{s(T) - s(T - \delta)\} / \delta - \\ &\quad k \operatorname{sgn}(s(T - \delta)) + d_{estimated}(T - \delta) + \\ &\quad \left\{ \int_{T-\delta}^T \left( c_1 \dot{e}_1(t) + \ddot{x}_d(t) + \frac{B}{J} x_2(t) - u_{eq}(T - \delta) \right) dt \right\} / \delta \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)의 우변에서 마지막 항은  $\delta$  가 매우 작으므로  $u_{eq}(T - \delta)$  와  $c_1 \dot{e}_1(t) + \ddot{x}_d(t) + \frac{B}{J} x_2(t)$  가 완전히 상쇄된다는 가정에서 발생하는 오차를 보정하는 역할을 하며<sup>5</sup>, 이를 정확히 계산하기는 매우 어렵다. 따라서 다음과 같은 근사값을 적용한다.

$$X_c(T) = -(u_{eq}(T) - u_{eq}(T - \delta)) / 2 \quad (12)$$

식 (12)를 식(11)에 대입하면  $d_{average}(T)$  의 최종형태를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_{average}(T) &= -\{s(T) - s(T - \delta)\} / \delta - \\ &\quad k \operatorname{sgn}(s(T - \delta)) + d_{estimated}(T - \delta) - \\ &\quad X_c(T) \end{aligned} \quad (13)$$

이렇게 구한  $d_{average}(T)$  값은  $T - \delta$  에서  $T$  사이에 들어온 외란의 적분 평균값이라고 할 수 있으며,  $d_{average}(T)$  로 외란의 함수 형태를 예측하여 다음 시간대에 제어입력에 들어갈 외란 추정값  $d_{estimated}(t)$  를 구할 수 있다. 여기서 외란의 예측 방법으로서 다음과 같이 Tayer 전개를 이용한다.

$$d_{estimated}(t) = \sum_{i=0}^n \delta^i \cdot d_{average}^{(i)}(T) / i! \quad (14)$$

여기서  $i$  는 Tayer 전개 의 미분 차수 이다.  $d_{estimated}(t)$  는  $T$  시간 이전 의  $d_{average}(T)$  들만 으로 얻 어 지고 이 렇 게 얻 어 진 식 (14) 의  $d_{estimated}(t)$  는 식 (13) 의  $d_{average}(T)$  보 다  $T$  시간 의 외란 에 보 다 근 접 한 값 일 것 이고 실 제 구 현 시 에 는 적 당 한 차 수 까 지 만 전 개 하 여 사 용 한 다. 따 라 서 본 연 구 에 서 제 안 한 SMCDE 는 식 (6) 으 로 부 터 다 음 과 같 이 표 현 할 수 있 다.

$$u(t) = J \{ u_{eq}(t) + k \operatorname{sgn}(s(t)) - d_{estimated}(t) \} \quad (15)$$

결론적으로 외란 추정기를 갖는 슬라이딩 모드 제어기는 식(13), (14), 그리고 (15)로 구성된다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제안한 SMCED의 우수한 제어 성능을 입증하기 위해 Fig. 1 과 같은 실험장치를 구성하였다. 모터의 각변위( $e$ )는 엔코더로부터 얻어지며 엔코더보드를 통하여 컴퓨터(PC)로 피드백되고  $\dot{e}$ 은 이를 미분하여 구하였다. 측정된 위치 성분과 계산된 속도성분으로부터 슬라이딩 모드 제어기에서 입력 토크가 결정되며 이는 D/A 변환기와 서보 드라이브를 통하여 모터에 입력된다. 드라이버의 이득값에 따른 영향을 배제시키기 위해 실험이 수행되는 동안 드라이버의 이득은 동일한 값을 가지도록 하였다. 여기서 모터에 입력되는 전압은 서보 드라이브를 통해 전류로 변환되어 모터에 공급되고 결국 입력된 전압에 상응하는 토크로 시스템에 작용하게 된다. 한편, 본 연구에서 사용된 모델변수 값과 제어변수 값은 다음과 같다 ;

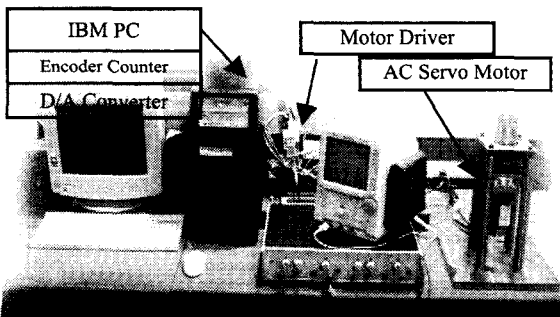


Fig. 1 Photograph of an experimental apparatus

$J = 0.00268 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, B = 0.0347568 \text{ Nm} \cdot \text{s}, c = 0.29481, k = 0.2, \delta = 0.001 \text{ sec}$ . 모터측의 위치를  $0^\circ$ 에서  $45^\circ$ 로 정착하는 실험을 수행하였으며, 주파수가 다른 여러 형태의 외란을 부가 하였는데 추가적인 액추에이터가 없기 때문에 제어 입력 전압에 외란 전압을 더해 주는 방법으로 외란을 가하였고 각각 실험에서  $k=0.2$ 의 같은 값을 사용하였다.

Fig. 2 와 Fig. 3 은 크기가  $0.02 \text{ Nm}$  이며 주파수가

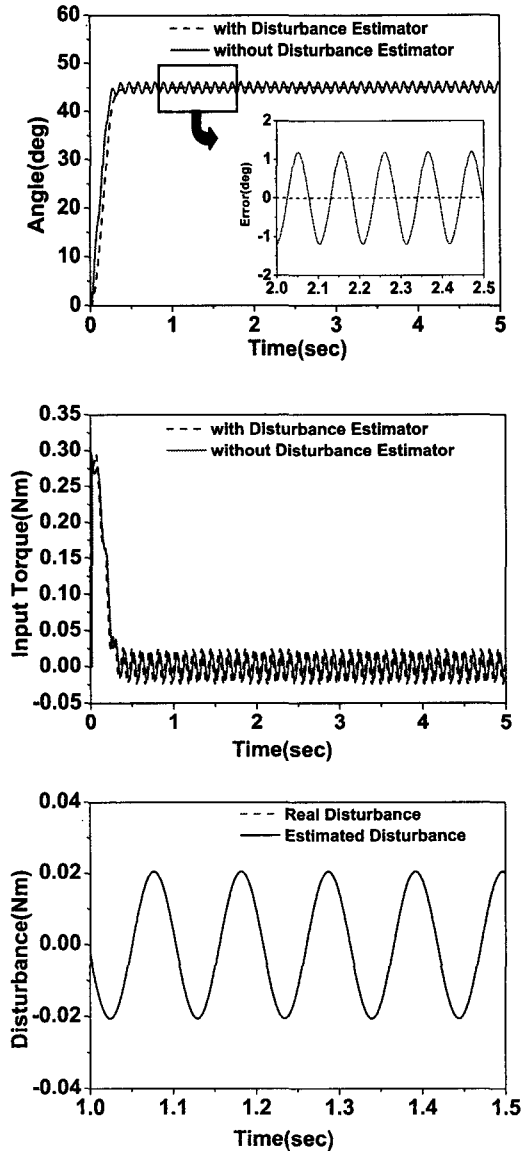


Fig. 2 Simulated control responses in the presence of the torque disturbance (9.5Hz)

9.5Hz 인 외란을 인가하였을 때 얻은 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과를 각각 나타낸다. 두 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안한 SMCDE의 사용으로 인가된 외란을 정확하게 예측하고 있으며, 이로 인해 정착제어 성능이 기존의 SMC에 비해 매우 우수함을 고찰할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션의 경우 외란 예측오차가 거의 0%에 가까우며,

실험결과의 경우에도 예측오차와 5% 미만으로 유지됨을 확인할 수 있다. Fig. 3에서 실험에 의한 외란 예측오차가 사인곡선의 피크지점에서 유사한 오차특성을 보이는데 이는 마찰력으로 인한 시스템 불확실성등에 기인하며 이와 같은 시스템의 불확실성으로 인해 외란만의 정확한 오차 추정은 힘들지만 정확한 섭동의 추정은 가능하며 모터의 정

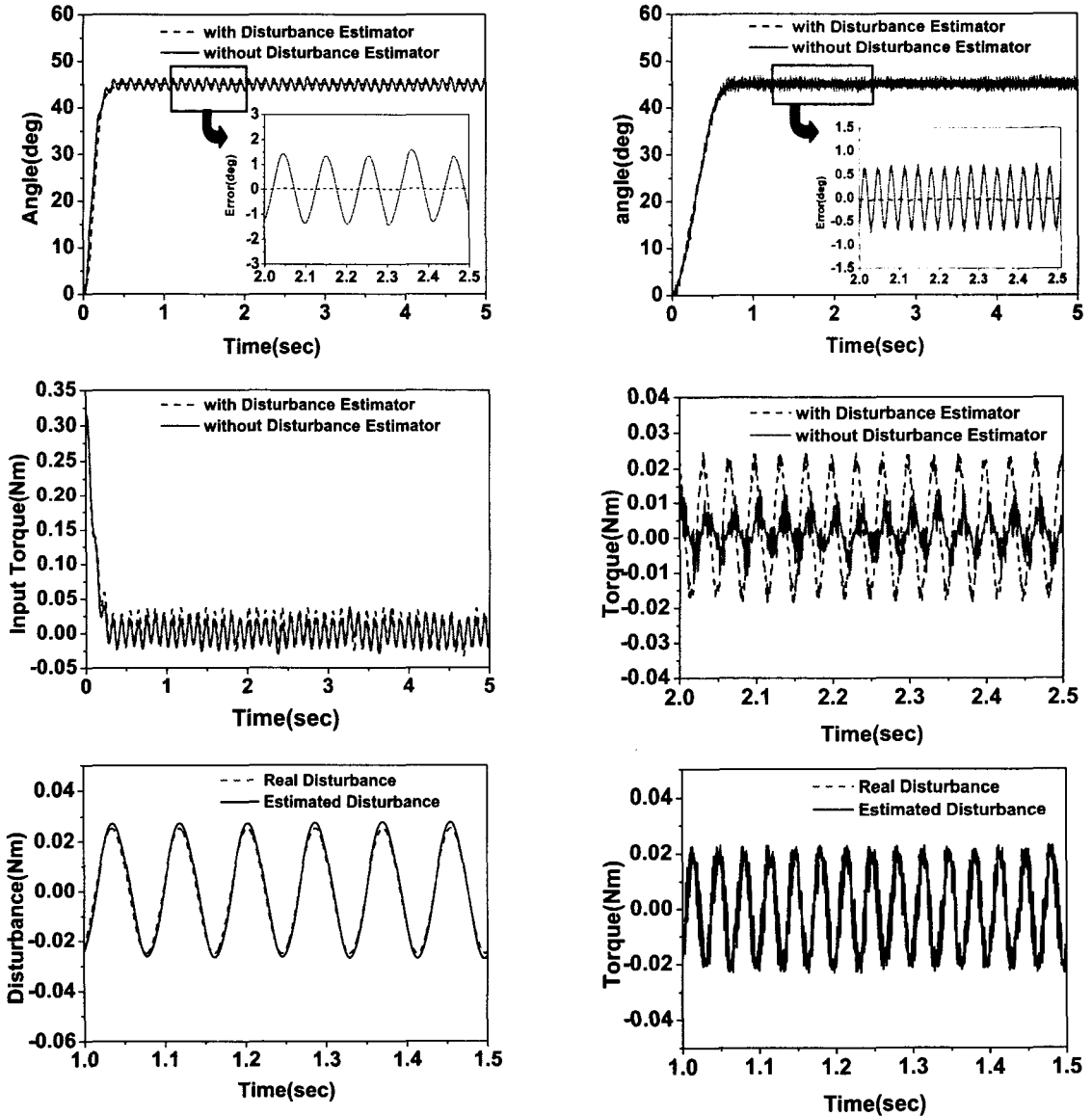
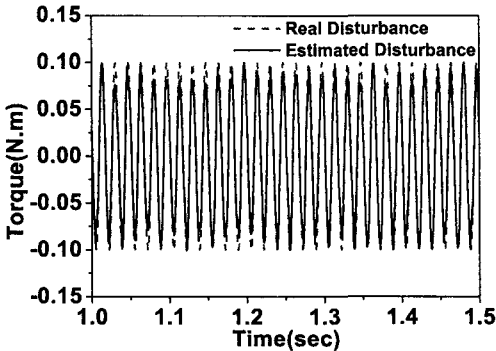
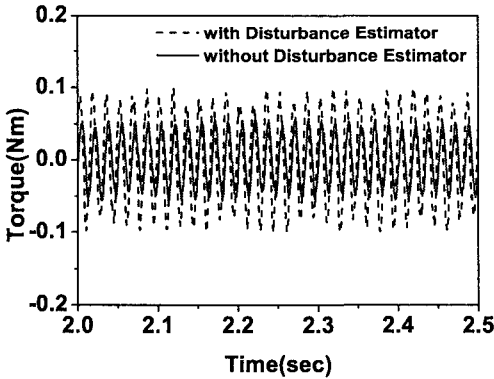
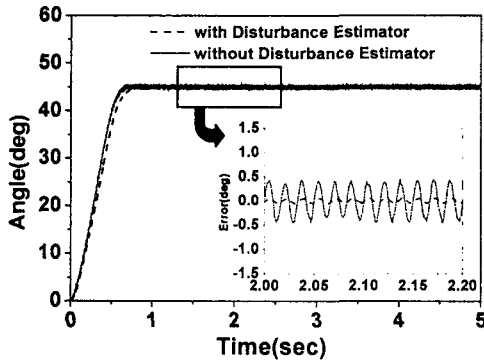


Fig. 3 Measured control responses in the presence of the torque disturbance (9.5Hz)

(a) 30Hz

Table 1 Average disturbance error for each sampling time

Sampling Time( $\delta$ )	0.0005	0.001	0.005	0.01
Average Disturbance Error(%)	0.000003 %	0.01 %	0.06%	0.5%



(b) 60Hz

Fig. 4 Measured control responses with different disturbance frequencies

작 제어에 있어 그다지 큰 영향을 미치지 않는다. 한편, 보다 높은 주파수를 갖는 외란에 대한 제어 성능 고찰을 위해 크기가  $0.02Nm$  이며, 주파수가 30Hz 와 60Hz 인 외란을 인가하여 그 실험 결과를 Fig. 4 (a) (b)에 나타내었다. 이 경우에도 기존 SMC 에 비해 매우 우수한 정착 제어가 수행되었음을 쉽게 고찰할 수 있다. Table 1 은 샘플링 시간에 따른 평균 외란 오차를 나타내고 있고, 제어기 설계 과정에서 언급 하였듯이 외란 예측에 대한 정확성과 정착제어의 우수성은 사용 된 외란 예측 샘플링시간( $\delta$ )에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다. 만일 샘플링시간이 커지거나 외란 주파수가 높아 지게 되면 예측오차는 증가하게 되고 이에 따라 제어성능은 저하하게 될 것이다. 따라서, 하드웨어 가 허용하는 범위 내에서 비교적 높은 예측 샘플링시간을 사용하는 것이 바람직하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 외란을 받고 있는 AC 서보 모터의 위치제어를 위해 외란 추정기를 갖는 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. SMCDE 로 명명된 이 제어기는 외란의 적분 평균값을 사용하고 있기 때문에 기존 방법에 비해 떨림 현상이 적어 매우 정확하고 안정적인 외란 추정과 이로 인한 우수한 제어성능확보가 가능하다. 이러한 장점을 입증하기 위해 AC 서보 모터의 위치제어 실험장치를 구성한 후 주파수형태가 다른 여러 형태의 외란을 인가한 후 정착위치제어를 수행하였다. 예상한 대로 주파수가 다른 여러 외란 인가시에 정확한 외란 예측과 우수한 정착제어성능이 확보되었다. 향후 정현파형태의 외란이 아닌 여러 가지 형태의 외란과 예측 샘플링시간 변화에 따른 제어 성능 고찰이 계속 진행될 예정이다.

#### 참고문헌

1. Choi, S. B., and Cheong, C. C., "A Robust Tracking Control for Robotic Manipulators Using Sliding Modes," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 18-22, 1992.
2. Lee, J. H., Ko, J. S., Chung, S. K., Lee, J. J. and Youn, M. J., "Design of Continuous Sliding Mode Controller for BLDD Motor with Prescribed

- Tracking Performance," IEEE Transactions on Automatic Control, pp. 770-775, 1992.
3. Weibing, G. and James, C. H., "Variable Structure Control of Nonlinear Systems : A New Approach," IEEE Transactions. Ind. Electron. Vol. 40, No. 1, pp. 45-55, 1993.
  4. Gomes, S. C. P. and Chretien, J. P., "Dynamic Modeling And Friction Compensated Control of A Robot Manipulator Joint," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1429-1435, 1992.
  5. Utkin, V. I., "Variable Structure System with Sliding Modes," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-22, No. 2, pp. 212-222, 1977.
  6. Choi, S. B., Park, D. W. and Jayasuriya, S., "A Time-Varying Sliding Surface for Fast and Robust Tracking Control of Second-Order Uncertain Systems," Automatica, Vol. 30, No. 5, pp. 899-904, 1994.
  7. Young, K. D., Utkin, V. I. and Ozguner, U., "A Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control," Control Systems Technology, IEEE Transactions, Vol. 7, pp. 328-342, 1999.
  8. Park, D. W. and Choi, S. B., "Moving Sliding Surfaces for High-Order Variable Structure Systems," International Journal of Control, Vol. 72, pp. 960-970, 1999.
  9. Kozek, M., Puchhammer, G. and Jorgl, M. P., "A MIMO Sliding Mode Control for a High Speed EMS MAGLEV-Vehicle using Disturbance Estimation," Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 587-592, 1994.
  10. Lu, Y. S. and Chen, J. S., "Design of a Perturbation Estimator Using the Theory of Variable-Structure Systems and Its Application to Magnetics Levitation Systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 3, pp. 281-289, 1995.
  11. Liu, C. S. and Peng, H., "Disturbance Observer Based Tracking Control," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 122, No. 2, pp. 332-335, 2000.
  12. Elmali, H. and Olgac, N., "Sliding Mode Control with Perturbation Estimation (SMCPE) : A New Approach," International Journal of Control, Vol. 56, No. 4, pp. 923-941, 1992.
  13. Elmali, H. and Olgac, N., "Implementation of Sliding Mode Control with Perturbation Estimation (SMCPE)," IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 4, No. 1, pp. 79-85, 1996.
  14. Kim, J. H., Eun, Y. S. and Cho, D. I., "Variable Structure Control of AC Servo Motors for Performance and Robustness Improvement," KACC, pp. 515-518, 1995.