

리니어모터 스테이지 직진도 향상을 위한 서보 시스템 개발

감민식*(경원대 기계공학과), 최정덕(경원대 대학원 기계공학과)

Development of Servo-system for Straightness Improvement of Linear Motor Stage

M. S. Kang(Mech. Eng. Dept., KWU), J. D. Choi(Mech. Eng. Dept., KWU)

ABSTRACT

In this paper a servo-system is developed to improve straightness of linear motor stages. When a linear motor stage is used for high-precision linear motion systems, high precision straightness accuracy is necessary to meet the required position accuracy. In such cases, machining and assembling cost increases to improve the straightness accuracy. An electro-magnetic actuator which is relatively cost effective than any other conventional servo-systems is suggested to compensate the fixed straightness error. To overcome the compensation error due to the friction, a sliding mode control is applied. The effectiveness of the suggested mechanism and the control performance are illustrated along with some experimental results.

Key Words : Straightness(직진도), Electro Magnetic Actuator(전자기 액츄에이터), Sliding Mode Control(슬라이딩모드 제어), Friction(마찰)

1. 서론

일반적으로 모터의 회전을 이용하여 직선운동 메커니즘을 구성하는 데는 부가적인 기구장치가 필요하다. 그러나 리니어 모터는 회전 모터를 펼쳐 놓은 방식으로 직접 직선을 하므로 부수적인 기구장치가 필요 하지 않아 편리하다. 리니어 모터의 동작 원리는 일반 모터와 같으며, 그 구조는 코일을 고정하고 구동부에 영구자석을 설치하는 방식과 그 반대로 영구자석을 고정하고 코일이 구동 되는 구조로 나눌 수 있다. 리니어 모터 스테이지는 이러한 리니어 모터 원리를 이용하여 만든 직선운동 장치이다. 이 스테이지에서 부하는 기계적 가이드에 의해 결정된 안내선을 따라 직선운동을 한다. 따라서 가이드의 가공정도와 조립 정도에 따라 직선운동의 직진도가 결정된다. 현재 리니어 모터 스테이지는 반도체 제조 공정에 많이 사용되고 있는데, 이 경우 나노미터 수준의 직진도가 요구 된다. 나노미터 수준의 직진도 정확성을 보장하기 위해서는 기계적 가공 정밀도와 조립 정밀도 또한 나노미터 수준을 보장해야 되나, 기계적 가공으로는 요구 되는 정밀도를 보장하는데 한계가 있으며, 가능하다더라도 가공 비용이 매우 높다. 조립 공정 또한 높

은 기술과 많은 시간이 요구된다. 더구나 직선 이송거리가 긴 경우 더 이상 기존의 기계적 가공에 의한 직진도 보장에는 한계가 있다.

본 연구에서는 이러한 리니어 모터 스테이지에서의 나노미터 수준의 직진도를 보장하기 위해 직선운동 방향과 수직 방향으로 움직이는 정밀 서어보 장치를 추가적으로 장착하는 방법을 제안한다. 즉, 리니어 모터 스테이지의 각 위치에서 직진도 오차를 측정하고, 해당 위치에서 측정된 직진도 오차만큼 서어보 장치를 이용하여 반대방향으로 보상하는 방법을 이용하여 직진도 오차를 감소시키는 방법을 사용한다. 부하는 이 서어보 장치 위에 장착된다.

서어보 장치 구성으로는 추가적인 리니어 모터 스테이지를 추가하는 방법이나 볼-스크류 메커니즘을 고려할 수 있으나 리니어 모터를 추가할 경우 정밀도는 보장할 수 있으나 가격의 상승이 높으며, 볼-스크류 메커니즘을 사용할 경우 가격 상승은 물론 백래시에 의한 정밀도 유지가 어렵게 된다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완할 수 있는 전자기 액츄에이터를 이용한 서어보 시스템을 제안한다. 전자기 액츄에이터는 위의 메커니즘에 비해 구조가 간단하고 가격이 저렴하며, 나노미터 수준의 정밀

도를 유지하기가 용이한 장점을 갖고 있다.

추가적인 서어보 장치에서 마찰은 위치 정밀도를 저해하는 요인으로 작용한다. 마찰은 기계적 접촉이 존재하는 경우 피할 수 없는 비선형 특성을 갖는 현상으로 아직 그 현상에 대한 정확한 규명은 미진한 편이며, 특히 사용 환경에 따라 그 특성의 변화가 심하다. 서어보 제어계에서 마찰은 상대 속도가 작은 경우 스틱-슬립(stick-slip)현상을 유발하며, 정상상태 위치오차, 과도 응답을 나타내거나, 리밋 사이클(limit cycle)을 보인다. 마찰의 제어를 위한 많은 제어 방법이 소개되어 있으나, 아직 마찰의 완벽한 제어방법은 보고되어있지 않다.

본 연구에서는 마찰에 의한 직진도 오차 개선을 위해 슬라이딩모드 제어를 적용한다. 슬라이딩모드 제어는 비선형 외란을 갖는 시스템에 널리 이용되는 간단한 구조의 제어기로 계의 동특성에 관계없이 제어 성능을 규정할 수 있는 특징을 갖는다.

본 연구에서는 제안된 방법에 따라 서어보 장치를 제작하고 실험을 통해 제안된 방법의 적용성과 성능을 검증하였다. 실험 결과 슬라이딩모드 제어가 마찰에 의한 직진도 오차의 감소에 효과적임을 확인 하였으며, $\pm 11\mu m$ 수준의 직진도 오차를 $\pm 0.5\mu m$ 수준으로 개선할 수 있었다.

2. 시스템 모델

2.1 운동방정식

본 논문에서 사용된 실험장치는 Fig. 1 과 같은 1-자유도 서어보 시스템이다. 이 시스템은 부하를 장착하며 좌우로 움직일 수 있는 상부의 슬라이더, 슬라이더의 이동을 안내하는 안내면이 있다. 슬라이더는 알루미늄으로 제작되었으며, 중앙부에 자성체 블록이 조립되어있고, 자성체를 중심으로 양쪽에 슬라이더에 구동력을 제공하는 한 쌍의 전자석이 조립되어있다. 슬라이더의 좌우 위치는 선형 엔코더에 의해 측정되며, 디지털 제어를 위한 컴퓨터로 구성되었다. 계의 제어는 DSP(digital signal processor)보드를 장착한 컴퓨터에 의해 이루어진다. 이 서어보 시스템은 Fig. 1의 상하 방향으로 운동하는 리니어 모터 스테이지 위에 고정된다.

이 서어보 시스템은 다음 운동방정식으로 기술된다.

$$m\ddot{x} = f_c + f_d \quad (1)$$

여기서 m 은 슬라이드 질량, x 는 슬라이드의 좌우 변위, f_c 는 전자기력을 나타내고, f_d 는 마찰을 나타낸다.

전자석에 의해 슬라이드에 전달되는 전자기력은

(2)식과 같이 코일 전류의 제곱에 비례하고, 공극의 제곱에 반비례하는 비선형 특성을 보인다.

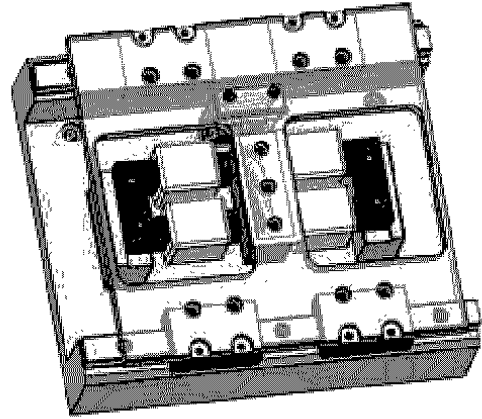


Fig. 1 Schematic drawing of experimental set-up

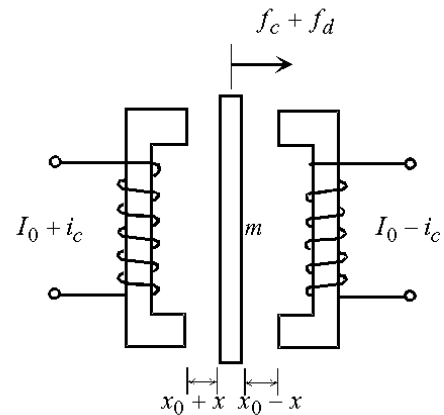


Fig. 2 Schematic diagram of the servo-system

$$f_c = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\left(\frac{I_0 + i_c}{x_0 - x} \right)^2 - \left(\frac{I_0 - i_c}{x_0 - x} \right)^2 \right] \quad (2)$$

위 식에서 μ_0 는 공기의 투자율, A 는 자극의 단면적, N 은 코일의 감은 횟수, I_0 는 바이어스(bias)전류, i_c 는 제어전류, x_0 는 공칭공극, x 는 전자석과 자성체 블록 사이의 공칭공극을 기준으로 한 공극의 변화이다.

식 (2)를 운용점 (I_0, x_0) 을 기준으로 선형화 하면 다음과 같이 정적 선형관계를 얻을 수 있다

$$f_c = K_x x + K_i i_c \quad (3)$$

여기서 K_x 는 위치강성(position stiffness), K_i 는 전류강성(current stiffness)을 나타낸다.

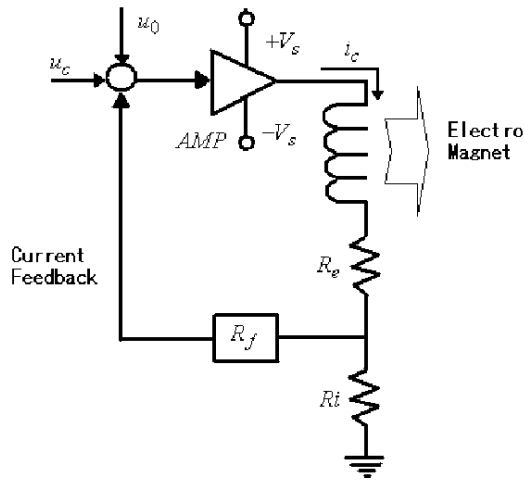


Fig. 3 Current amplifier model

Fig. 3 은 코일에 전류를 공급하는 전력증폭기로서 내부에 전류 되먹임 회로를 구성하여 입력전압에 비례하는 코일전류를 얻는 방식이다. 즉,

$$i_c = K_a u \quad (4)$$

여기서 K_a 는 증폭기 이득, u 는 제어 입력 전압이다. 실제 코일에 흐르는 전류는 바이어스전류 I_0 와 제어전류 i_c 의 합이 흐르며 제어 전류가 인가된 전자석 코일은 원하는 위치에 슬라이드를 위치시킬 수 있도록 전자력을 발생시킨다.

식(3)과 (4)를 식(1)에 대입하면 다음의 운동방정식을 얻는다.

$$m\ddot{x} - K_x x = K_a K_i u + f_d \quad (5)$$

이 운동계는 음의 강성을 가지므로 불안정하며, 마찰이 외란으로 작용함을 알 수 있다. 이 계에서 제어의 목적은 우선 계를 안정화 시키고, 외란이 위치 정밀도에 미치는 영향을 최소화하여 슬라이더의 위치 $x(t)$ 가 기준입력위치를 추종하도록 하는 것이다

2.2 변수 식별

식(5)에서 계의 특성을 결정하는 파라미터들은 K_x , K_i , K_a 이며, 이 중 K_a 는 전력증폭기 특성 시험에서 얻을 수 있으며, K_x , K_i 는 해석적인 방법에 의해 식별할 수 있지만 조립 전후 조건의 변화에 따른 변화를 해석적으로 구하는 것은 어렵다. 따라서 조립 후 실험적인 방법에 의해 식별하는 것

이 정확성을 높일 수 있다. 실험에 의해 파라미터를 얻기 위해서는 우선 식(5)의 계가 불안정하므로 안정화 시켜야 된다. 안정화를 위해 PID-제어를 설계 파라미터를 기준으로 설계하였으며, 마찰에 의한 정상상태 오차를 제거하기 위해 적분제어가 포함 되었다.

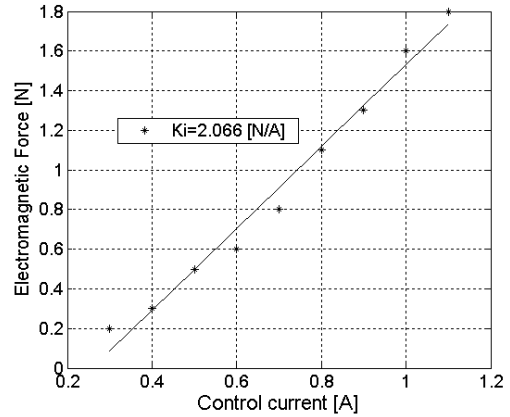


Fig. 4 Relation between current and magnetic force

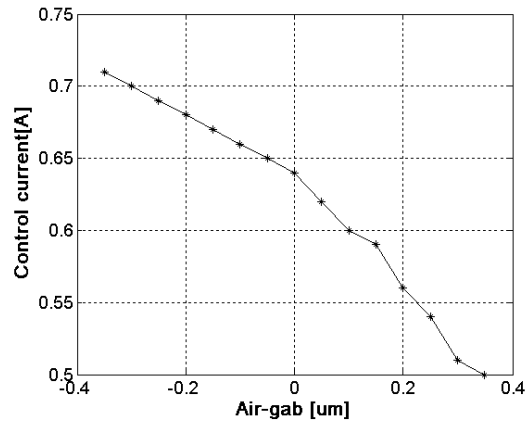


Fig. 5 Relation between air-gap and current

Fig. 4 는 슬라이더를 설계된 PID-제어를 적용하여 공칭 공극 위치에 위치시킨 다음 슬라이더 측면에 하중계(Force gage)를 설치하여 슬라이더가 움직이지 못하도록 구속한 상태에서 코일에 공급되는 전류를 변화시키면서 측정된 힘의 관계를 보인다. 비교적 선형 관계를 잘 만족함을 알 수 있으며, 직선의 기울기로부터 구한 전류강성은 $k_i = 2.066 [N/A]$ 이다.

Fig. 5 는 PID-제어를 이용하여 기준 위치입력을 변경하면서 슬라이더의 위치 변화에 따른 코일 전류를 측정된 결과이다. 공극이 영인 지점은 공칭공극 위치를 나타내며, $x=0$, 이 때의 전류는 바이

어스 전류를 나타낸다. Fig. 5 의 결과와 앞에서 구한 전류강성을 이용하여 얻은 위치강성은 $k_x = 624.22 [N/m]$ 이다. Table 1 은 결정된 계의 파라미터를 보인다. 사용된 엔코더는 직선형 엔코더로 분해능은 $0.1 \mu m$ 이다.

Table 1 Parameters of Magnetic Actuator

Parameters	Data	Value
$m[\text{kg}]$	Mass	0.5
$A[\text{m}^2]$	Area of pole face	$16 \times 5 \times 10^{-4}$
N	Coil turn	400
$I_0[\text{A}]$	Bias current	1.0
$\mu[\text{H/A}]$	Permeability of free space	$4\pi \times 10^{-7}$
$K_x[\text{N/m}]$	Position stiffness	624.22
$K_i[\text{N/A}]$	Current stiffness	2.066
$K_a[\text{A/V}]$	Amplifier gain	0.4
$x_0[\text{mm}]$	Nominal air-gap	1.5
[μm]	Encoder resolution	0.1

3. 슬라이딩 모드 제어

식 (5)의 시스템을 안정화 시키고 마찰에 의한 추종 오차를 줄이기 위해 슬라이딩 모드 제어기를 적용한다. 우선 식(5)를 상태공간 방정식으로 나타내면 식 (6)과 같다. 이 계는 타입-0 계이므로 정적 마찰에 의한 정상상태 오차를 제거하기 위해 변위의 적분이 포함된 상태공간 방정식으로 나타낸다.

$$\dot{x} = Ax + B_u u + B_a \ddot{r} + B_d \dot{r} + B_f f_d \quad (6)$$

여기서 상태변수, 입력벡터, 외란벡터 및 시스템 행렬은 각각 다음과 같이 정의 된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & k_1 & 0 \end{bmatrix} \quad B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \end{bmatrix} \quad B_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_1 \end{bmatrix} \quad B_f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

$$k_1 = \frac{K_x}{m} \quad b_1 = \frac{K_o K_t}{m} \quad b_2 = \frac{1}{m}$$

슬라이딩모드 제어기 설계를 위해 슬라이딩 평면 $\sigma(t)$ 를 아래와 같이 정의하면, 슬라이딩 제어는

계의 상태를 이 슬라이딩 평면에 유지시키도록 한다.

$$\sigma(t) = Sx(t) \quad (7)$$

슬라이딩 제어 입력 $u(t)$ 는 아래와 같이 두 부분으로 구성 된다.

$$u(t) = u_{eq} + u_n \quad (8)$$

본 시스템에서 제어 목적은 기준입력에 대한 슬라이더의 추종오차가 최소가 되도록 하는데 있으므로 다음과 같이 슬라이딩 평면을 규정하는 행렬 S 를 설정할 수 있다.

$$S = [\omega_n^2 \quad 2\zeta\omega_n \quad 1] \quad (9)$$

슬라이딩 평면에서는 $\sigma(t) = \dot{\sigma}(t) = 0$ 이므로 등가 입력은 슬라이딩 평면의 미분을 영으로 하여 구한다. 즉,

$$\dot{\sigma} = S\dot{x} = S[Ax + B_u u + B_d \ddot{r} + B_d \dot{r}] = 0 \quad (10)$$

따라서 등가제어입력(equivalent control input)은 다음과 같이 결정된다.

$$u_{eq} = -(SB_u)^{-1} \{SAx + SB_d \ddot{r} + SB_d \dot{r}\} \quad (11)$$

여기서 SB_u 는 비특이(nonsingular) 행렬로 가정한다. $u_{eq}(t)$ 는 계의 상태가 슬라이딩 평면에 도달되면 그 후 항상 그 평면에 존재하도록 하는 입력이며, $u_n(t)$ 는 계의 상태를 슬라이딩 평면에 도달되도록 하는 불연속적 도달제어입력(reaching control input)이다.

도달제어입력의 도달법칙 만족성을 평가하기 위해 다음의 Lyapunov 함수를 정의 하면

$$V(t) = \frac{1}{2} \sigma(t)^T \sigma(t) \quad (12)$$

도달법칙은 이 함수의 도함수가 음이 되면 만족된다.

$$\dot{V} = \sigma(t)\dot{\sigma}(t) = \sigma(t)S\{Ax(t) + B_u u(t) + B_d \ddot{r} + B_d \dot{r} + B_f f_d\} \quad (13)$$

만일 도달제어입력을 다음과 같이 정하면,

$$u_n = -(SB_u)^{-1} \phi \sigma(t) - (SB_u)^{-1} \rho \text{sign}[\sigma(t)] \quad (14)$$

식(13)은 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma(t) \{-\phi\sigma(t) - \rho \text{sign}[\sigma(t)] + SB_f f_d\} \quad (15) \\ &= -\phi\sigma^2(t) + \sigma\{SB_f f_d - \rho \text{sign}[\sigma(t)]\} \end{aligned}$$

만약 다음과 같은 ρ 가 존재한다면,

$$|SB_f f_d| < \rho \quad (16)$$

식(15)에서 우항의 합이 음이며, 또한 ϕ 는 음의 값을 선정하므로 식(13)의 도함수는 음이 되어 슬라이딩 평면의 도달 법칙을 만족한다. 식(16)에서 마찰 f_d 는 유한한 값을 가지므로 식(16)을 만족하는 ρ 가 존재한다. 따라서 최종적으로 결정되는 제어기는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} u &= -(SB_u)^{-1} \{SAx(t) + SB_d \ddot{r}(t) + SB_d r(t)\} \\ &\quad - (SB_u)^{-1} \{\phi\sigma(t) + \rho \text{sign}[\sigma(t)]\} \quad (17) \end{aligned}$$

식(17)에서 부호함수는 실제 적용시 응답에 체터링(chattering)을 야기한다. 따라서 이 부호함수 대신 다음의 근사식을 사용하여 체터링을 방지할 수 있다.

$$\text{sign}[f(t)] \cong \frac{f(t)}{\|f(t)\| + \varepsilon}, \varepsilon > 0 \quad (18)$$

식(17)의 제어기에서 선형부를 u_L 이라 하면 다음과 같다.

$$u = -(SB_u)^{-1} \{SAx(t) + SB_d \ddot{r}(t) + SB_d r(t) + \phi\sigma(t)\} \quad (19)$$

이 제어기는 상태피드백제어로 일반적인 PID-제어기 형태를 갖는다. 이를 마찰과 모델링 오차를 제외한 선형모델에 적용할 경우 슬라이딩 함수는 다음의 특성을 갖게 된다.

$$\dot{\sigma}(t) = \phi\sigma(t) \quad (20)$$

따라서 슬라이딩 함수는 ϕ 의 특이값에 따라 안정성과 수렴성이 결정된다.

본 실험의 시스템에서 제어 목적은 추종오차를 억제하는데 있으므로 슬라이딩 평면을 규정하는 행렬 S 를 다음과 같이 설정하면

$$S = [\omega_n^2 \quad 2\zeta\omega_n \quad 1] \quad (21)$$

식(7), (21) 및 (20)에서 다음을 얻는다.

$$\omega_n^2 \dot{x}_1 + 2\zeta\omega_n \dot{x}_2 + \dot{x}_3 = -\phi(\omega_n^2 x_1 + 2\zeta\omega_n x_2 + x_3) \quad (22)$$

식(22)에 상태변수의 정의를 이용하여 라플라스 변환하면 폐회로의 동력학은 다음으로 주어진다.

$$(s + \phi)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \frac{E(s)}{s} = 0 \quad (23)$$

여기서 $E(s)$ 는 오차 $e(t)$ 의 라플라스 변환이며, s 는 라플라스 연산자이다. 식(23)으로부터 오차 $e(t)$ 의 폐회로 동력학은 감쇠비 ζ 와 고유진동수 ω_n 에 해당되는 극점과 $s_3 = -\phi$ 에 극점을 갖게 된다. 따라서 폐회로의 동력학은 슬라이딩 평면을 정의하는 행렬 S 와 ϕ 에 의해 직접적으로 결정됨을 알 수 있다. 또한 좌변의 적분기에 의해 임의의 상수항으로 나타나는 오차에 의한 정상상태 오차가 제거됨을 알 수 있다.

4. 실험결과 및 논의

이상에서 제시된 슬라이딩모드제어의 적용성 및 성능 검증을 위해 Fig. 1의 실험 장치를 이용하여 실험하였다. 슬라이딩 모드 제어기는 Table 1의 파라미터를 이용하였다.

슬라이딩 평면을 결정하는 식(25)의 행렬 S 에서 감쇠비 $\zeta = 0.8$, 고유진동수 $\omega_n = 35\text{Hz}$ 로 선정하였으며, $\phi = 100$ 로 선정하였다. 따라서 슬라이딩 모드 제어기의 선형제어부에 의한 폐회로 극점은 $s_{1,2} = -28 \pm j21$, $s_3 = -140$ 에 위치하게 된다. 제어에서 샘플링 주파수는 2 kHz로 설정하였다.

Fig. 6은 기준입력으로 크기 $\pm 50\mu\text{m}$, 주파수 0.8Hz인 사인파를 제공했을 경우 기준입력과 슬라이더의 위치응답을 보인다. 여기서 전반부는 [0-4.5초] 구간에서는 슬라이딩 모드 제어의 선형부만을 적용한 경우이며, 나머지 후반부는 슬라이딩 모드와 비선형 제어부를 추가한 경우의 응답이다. 선형부 제어는 앞에서 논의한 바와 같이 일반적인 PID-제어기 구조를 가지며, 이 선형제어에 의해 불안정한 제어계가 안정화 된 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6의 기준입력과 응답과의 차이인 응답 오차를 보인다. 비선형 제어입력의 크기와 식(22)의 ε 은 체터링이 발생하지 않는 범위에서 작은 값을 갖도록 실험적으로 조정하였다.

Fig. 7의 전반부에서 나타나는 큰 오차는 기준입력의 속도가 영이 되는 점, 즉 슬라이더의 이동 방향이 바뀌는 지점에서 나타나며, 그 원인은 마찰에 의해 발생된 스틱-슬립 현상으로 분석된다. 이 때 최대 위치오차는 $4.75[\mu\text{m}]$ 로 나타났다. 후

반부의 응답에서 보듯이 슬라이딩 모드 제어기의 비선형 항에 의해 이 마찰에 의한 응답의 오차가 현저하게 감소됨을 확인할 수 있으며, 이 때 위치 오차는 $0.8 [\mu\text{m}]$ 로 나타났다. 이로써 슬라이딩 모드 제어의 마찰에 의한 응답오차 개선 효과를 확인할 수 있다. 이론적으로 슬라이딩 모드 제어의 응답은 앞에서 설정한 슬라이딩 평면의 특성에 비추어 에러가 0 을 보여야 되나, Fig. 6 에서와 같이 잔여 응답이 남는 이유로는 적용한 제어기가 (1)무한대 스위칭을 만족하지 못하고, (2) 체터링을 제거하기 위해 사용한 부호 함수를 근사화 의한 오차와, (3) 디지털 출력을 제공하는 엔코더의 특성, (4) 엔코더의 분해능의 한계 등을 요인을 들 수 있다.

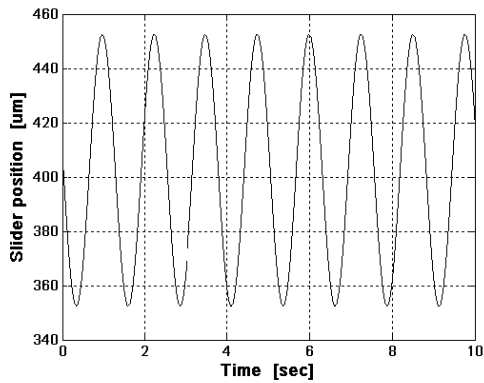


Fig. 6 Reference input and the corresponding position response

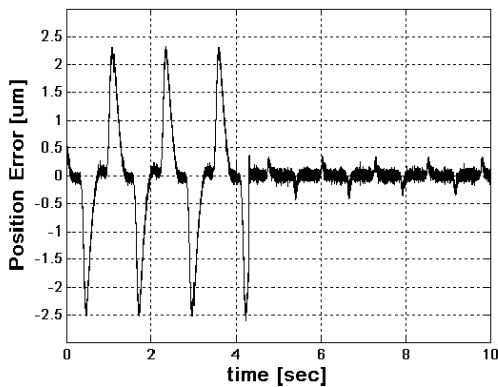


Fig. 7 Position errors by linear and sliding mode controls

실제 슬라이더는 리니어모터 스테이지의 상부에 조립되어 작동되는 시스템으로 최종적인 목표는 리니어모터 스테이지가 종방향으로 운동을 할 때 직각을 이룬 횡방향으로 발생하는 진직도 에러를 제거하는 것을 목적으로 하므로 사용하는 리니어 모터 스테이지의 종방향 위치에 따른 진직도 오차를

알아야 된다. 이 진직도 오차는 적용하려는 리니어 모터 스테이지마다 다르다. 따라서 본 연구에서는 현재 적용 대상으로 하는 리니어 모터 스테이지의 진직도 오차를 직접 측정하여 이 오차를 슬라이더의 기준 입력으로 취하였다.

Fig. 8 은 리니어모터 스테이지의 진직도 에러를 레이저 측정장비를 이용하여 측정한 데이터이다. 스테이지의 이송거리는 1760mm 이며, 이송 속도를 100mm/sec 하였을 때 1 회 왕복하면서 측정한 오차이다. 오차는 최대 $22.4 \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 전진과 후진 시의 진직도 오차는 거의 차이가 없는 것으로 확인 되었다. 주파수는 매우 낮다.

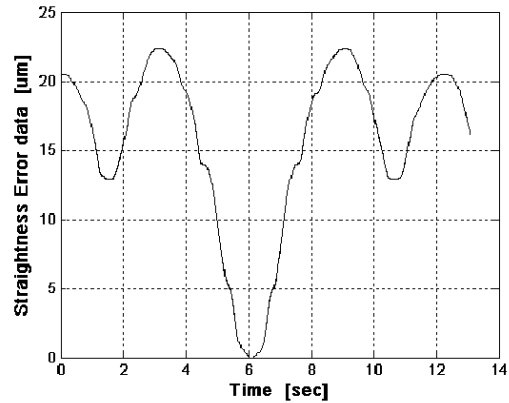


Fig 8 Straightness error of a linear motor stage

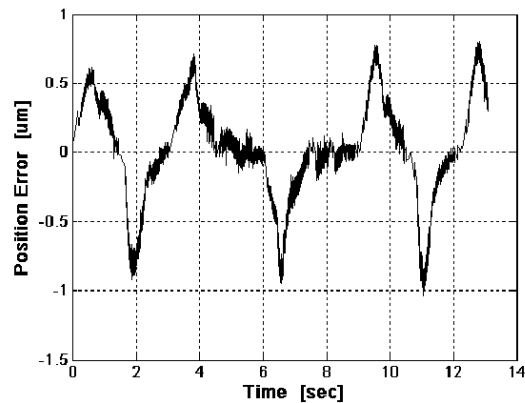


Fig. 9 Position error by linear part of SMC

Fig. 9 는 Fig. 8 의 진직도 오차를 슬라이더 서어 보계의 기준입력으로 제공하면서 제어한 경우 기준 입력과 슬라이더 위치의 오차를 보인다. 이 때 제어기는 앞에서 설계된 슬라이딩 모드 제어기의 선형부 만을 적용하였다. 앞에서와 같이 기준입력의 기울기가 영인 지점 이후에 큰 오차가 발생함을 알 수 있는데, 이는 앞에서와 같이 마찰에 의한 오차

임을 알 수 있다. 오차의 크기는 최대 $1.77\mu\text{m}$ 까지 발생함을 알 수 있다.

Fig. 10 은 위와 동일 조건에서 비선형 부분을 포함한 슬라이딩모드 제어의 응답을 보인다. 비선형 부분을 추가함에 따라 오차가 최대 $0.4\mu\text{m}$ 까지 감소됨을 알 수 있다. 이 오차는 사용된 엔코더의 분해능이 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 임에 비추어 뛰어난 성능을 보인다고 할 수 있다.

이상의 결과로서 본 연구에서 제안한 서어보 시스템은 리니어모터 스테이지의 진직도 오차를 보상 시스템으로서의 적용성을 확인 할 수 있으며, 슬라이딩 모드 제어를 통해 최대 위치오차 요인인 마찰을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인 할 수 있다.

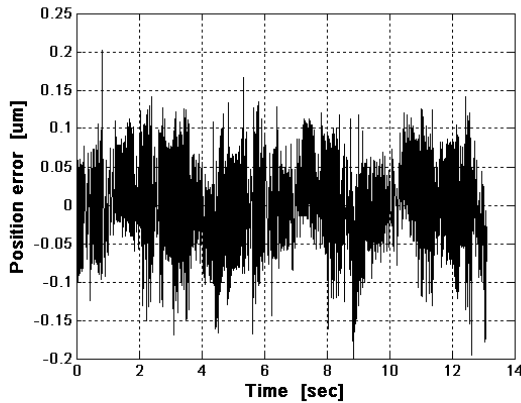


Fig. 10 Moving position error by sliding mode control

5. 결 론

본 연구에서는 리니어모터 스테이지에서 진직도 보상을 위해 전자석 액츄에이터를 이용한 서어보 시스템을 개발하였다. 이 서어보 시스템에서 마찰은 주요 외란 요소로 작용하며, 이 마찰에 의한 오차의 개선을 위해 슬라이딩모드 제어를 적용하였다. 실험 결과 제안된 서어보 시스템은 기존의 메커니즘에 비해 비용측면에서 저렴하며 슬라이딩 모드 제어가 마찰에 의한 오차 요소를 잘 보상하여 진직도를 나노미터 수준으로 유지할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2004 년 성남시 산학연 콘소시움 과제로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. C. Edwards, and S. K. Spurgeon, "Sliding Mode Control: Theory and Applications, " TAYLOR & FRANCIS Inc, 2004.
2. T. J. Yeh and Y. J. Chung, "Sliding control of magnetic bearing systems, " Proc of the American control Conference, pp 1622~1626, 2000.
3. 강민식 등, "MFXLMS 알고리즘을 이용한 전자기베어링 계의 외란 보상 제어기-이론," 한국정밀공학회, 제 21 권, 제 2 호. pp. 74~82, 2004.
4. 강민식 등, "MFXLMS 알고리즘을 이용한 전자기베어링계의 외란보상 제어기-실험," 한국정밀공학회, 제 21 권, 제 2 호. pp. 83~91, 2004.
5. 강민식, "능동자기베어링계의 슬라이딩모드 제어," 한국 소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 5 호, pp. 439~448, 2004.
6. 강민식, "자기베어링계에서 외란 관측기를 갖는 슬라이딩모드 제어," 대한기계학회지, 제 53D 권, 제 6 호, pp. 408~414, 2004.
7. Ogata, K. Modern Control Engineering, prentice-Hall Inc., 2004.
8. 권영건, 박정일, "신경회로망을 이용한 리니어 펄스 모터의 정밀제어," 제어·자동화·시스템 공학 논문지, 제 6 권, 제 11 호, pp. 987~994, 2000.
9. H. M. Gutierrez, and P. I. Ro, "Sliding-Mode Control of a Nonlinear-Input System: Application to a Magnetically Levitated Fast-Tool Servo," IEEE TRANSACTIONS INDUSTRIAL ELECTRONIC, vol. 45, No 6, pp. 921~927, 1998.