

리니어모터 스테이지 직직도 향상을 위한 서보 시스템 개발

論 文
54D-1-5

Development of a Servo-system for Straightness Improvement of Linear Motor Stages

崔正德* · 姜珉植†
(Jeng Duk Choi · Min Sig Kang)

Abstract - In this paper, we propose a slider servo-mechanism driven by electro-magnetic actuator to improve straightness of linear motor stages. Based on axial-position dependent deterministic characteristics of the straightness error, a feedforward compensation control is applied to reduce the straightness error. In the consideration of uncertain properties of friction and its effects on positioning accuracy, a sliding mode control is applied. The effectiveness of the suggested mechanism and the control performances are illustrated along with some experimental results.

Key Words : Straightness(진직도), Electro-magnetic Actuator(전자기 액츄에이터), Sliding Mode Control (슬라이딩모드 제어), Friction (마찰)

1. 서 론

일반적으로 모터의 회전을 이용하여 직선운동 메커니즘을 구성하는 데는 부가적인 기구장치가 필요하다. 그러나 리니어 모터는 회전 모터를 펼쳐 놓은 방식으로 회전자 부분이 직접 직선운동을 하므로 편리하다. 리니어 모터의 동작 원리는 일반 모터와 같으며, 코일을 고정하고 계자자석이 가동되는 자석가동형 리니어모터(moving magnet type)와 반대로 계자자석이 고정되고 코일이 가동되는 코일가동형 리니어모터(moving coil type)로 분류된다[1]. 리니어 모터 스테이지는 리니어 모터의 이동자 부분이 직선운동 할 수 있도록 안내면을 설치한 직선운동장치이다. 따라서 안내면의 가공정도와 조립 정도에 따라 직선운동의 진직도가 결정된다. 현재 리니어 모터 스테이지는 반도체 제조 공정에 많이 사용되고 있는데, 이 경우 나노미터 수준의 진직도가 요구된다. 나노미터 수준의 진직도를 보장하기 위해서는 기계적 가공 정밀도와 조립 정밀도 또한 나노미터 수준을 보장해야 되나, 기계적 가공으로는 요구되는 정밀도를 보장하는데 한계가 있으며, 가능하더라도 가공 비용이 매우 높다. 조립 공정 또한 높은 기술과 많은 시간이 요구된다. 따라서 산업계에서는 이송거리가 긴 리니어모터 스테이지에서 경제적인 방법으로 진직도를 보장할 수 있는 방법이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 리니어 모터 스테이지에서 나노미터 수준의 진직도를 보장하기 위해 이동자 상에 이동자의 진행방향

과 수직 방향으로 움직일 수 있는 정밀 서보 장치를 추가적으로 장착하는 방법을 제안한다. 즉, 미리 리니어 모터 스테이지의 진직도 오차를 측정하고, 이동자가 해당 위치에 왔을 때 해당 진직도 오차만큼 서보 장치를 반대방향으로 이동시켜 진직도 오차를 보상하는 방법을 사용한다. 부하는 이 서보 장치 위에 장착된다.

추가적인 서보 장치로는 리니어 모터 스테이지, 볼-스크류 메커니즘 또는 압전액츄에이터를 이용한 메카니즘을 고려할 수 있으나, 리니어 모터의 경우 정밀도는 보장할 수 있으나 가격 상승이 높으며, 볼-스크류 메커니즘의 경우 가격 상승은 물론 마찰과 백래시에 의한 정밀도 유지가 어렵다. 또한 압전액츄에이터를 이용한 메카니즘에서는 정밀제어가 가능하나 변위보상의 한계가 존재한다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 보완할 수 있는 전자기 액츄에이터를 이용한 이동자 시스템을 제안한다. 전자기 액츄에이터는 구조가 간단하고 가격이 저렴하며, 나노미터 수준의 정밀도를 얻기 용이한 장점을 갖고 있다[2].

이동자 시스템에서 마찰은 위치 정밀도를 저해하는 요인으로 작용한다. 마찰은 기계적 접촉이 존재하는 경우 피할 수 없는 비선형 특성을 갖는 현상으로 사용 환경에 따라 그 특성의 변화가 심하다. 서보 제어시스템에서 마찰은 상대속도가 작은 경우 스틱-슬립(stick-slip)현상을 유발하며, 정상상태 위치오차, 과도 응답을 나타내거나, 리밋 사이클(limit cycle)을 보인다[3, 4].

마찰의 제어를 위한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 일반적으로 고이득의 되먹임 제어에 의해 마찰에 의한 응답오차를 감소시키는 방법이 사용되나, 이득이 커질 경우 잡음 민감도가 증가하고 공진 발생의 문제가 발생할 수 있다. 그 밖에 마찰제어 방법으로는 마찰 관측기를 이용한 보상제어[5], 강인제어[6], 적응제어[7], 신경회로망제어[8], 슬라이딩모드 제어[9, 10, 11] 등이 소개된 바 있다. 슬라이딩모드 제

† 교신저자, 正會員 : 景園大學 機械工學科 副教授 · 工博
E-mail : makang@kyungwon.ac.kr

* 學生會員 : 景園大學 機械工學科 碩士課程
接受日字 : 2004年 10月 29日
最終完了 : 2004年 11月 26日

어는 시스템의 동적 모델과 무관한 동특성을 얻을 수 있고 시스템의 불확실성이나 비선형 외란 등에 강한 특성을 갖으며, 특히 마찰이 있는 시스템에서 우수한 제어 성능을 보인다[12, 13].

본 연구에서는 코일가동형 리니어모터를 이용하여 제작된 리니어모터 스테이지에서 진직도 향상을 위해 제안된 방법에 따라 가동자 서보장치를 적용하였으며, 실험을 통해 제안된 방법의 적용성과 성능을 검증하였다.

2. 시스템 모델

2.1 운동방정식

본 논문에서 사용된 실험장치는 리니어모터 스테이지의 이동자에 설치되며, 이동자의 진행방향과 직각방향으로 움직일 수 있는 가동자를 갖는 1-자유도 서보 시스템으로 그림 1과 같다. 가동자는 이동자에 설치된 안내면을 따라 움직이며, 부하는 가동자 위에 장착된다. 가동자는 알루미늄으로 제작되었으며, 중앙부에 자성체 블록이 조립되어 있고, 자성체를 중심으로 양쪽에 가동자에 구동력을 제공하는 한 쌍의 전자석이 조립되어있다. 가동자의 위치는 리니어스케일 센서에 의해 측정된다. 시스템의 제어는 DSP(digital signal processor)보드를 장착한 컴퓨터에 의해 이루어진다.

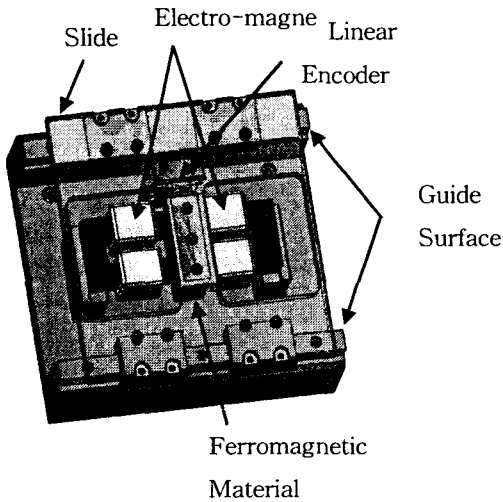


그림 1. 실험장치 개략도
Fig. 1 Schematic drawing of experimental set-up

이 서보 시스템은 다음 운동방정식으로 기술된다.

$$m\ddot{y} = f_c + f_d \tag{1}$$

여기서 m 은 가동자 질량, y 는 가동자의 변위, f_c 는 전자기력, f_d 는 마찰력을 나타낸다.

그림 2와 같이 한 쌍의 전자석 사이에 전자석의 자극 단면적에 비해 충분히 넓은 단면적을 갖는 자성체가 있을 경우 자성체에 전달되는 전자기력은 (2)식과 같이 비선형 특

성을 보인다.

$$f_c = \frac{\alpha\mu_0AN^2}{4} \left[\left(\frac{I_o + i_c}{y_o - y} \right)^2 - \left(\frac{I_o - i_c}{y_o + y} \right)^2 \right] \tag{2}$$

여기서 μ_0 는 공기의 투자율, A 는 자극의 단면적, N 은 코일의 감은 횟수, I_o 는 바이어스(bias)전류, i_c 는 제어전류, y_o 는 전자석과 자성체 블록 사이의 공칭공극, y 는 공칭공극을 기준으로 한 공극의 변화이다.

식(2)를 운용점 (I_o, y_o) 을 기준으로 선형화 하면 식(3)의 정적 선형관계를 얻을 수 있다

$$f_c = K_y y + K_i i_c \tag{3}$$

여기서 K_y 는 위치강성(position stiffness)계수, K_i 는 전류강성(current stiffness)계수이다.

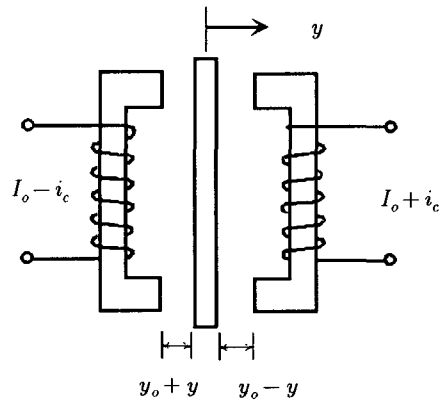


그림 2. 전자석의 기본 개념
Fig. 2 Principal of electro-magnet

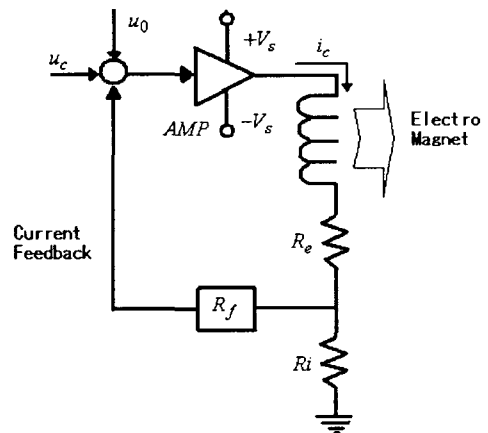


그림 3. 전력 증폭기 모델
Fig. 3 Current amplifier model

코일에 전류를 공급하는 전력증폭기는 그림 3과 같이 내부에 전류 되먹임 회로를 구성하여 입력전압에 비례하는 코일전류를 얻을 수 있다. 즉,

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

여기서 K_a 는 증폭기 이득, u_c 는 제어 입력 전압이다.

식(3)과 (4)를 식(1)에 대입하면 다음의 운동방정식을 얻는다.

$$m\ddot{y} - K_y y = K_o K_a u_c + f_d \quad (5)$$

이 운동시스템은 음의 강성을 가지므로 불안정하며, 마찰력이 외란으로 작용함을 알 수 있다. 따라서 이 시스템에서 제어의 목적은 우선 시스템을 안정화 시키고, 마찰력이 위치 추종정밀도에 미치는 영향을 최소화하여 가동자의 위치가 기준위치입력을 정밀하게 추종하도록 하는 데 있다.

2.2 시스템의 변수 식별

식(5)에서 시스템의 특성을 나타내는 파라미터인 K_o 는 전력증폭기 특성시험에서 얻을 수 있으며, K_y , K_i 는 해석적으로 얻을 수 있지만 조립 조건에 따라 변화하므로 조립 후 실험적인 방법에 의해 얻는 것이 정확성을 높일 수 있다. 실험에 의해 파라미터 K_y , K_i 를 얻기 위해서는 우선 식(5)의 시스템이 불안정하므로 안정화 시켜야 된다. 안정화를 위해 PID-제어를 설계 파라미터를 기준으로 설계하였으며, 마찰력에 의한 정상상태 오차를 제거하기 위해 적분제어가 포함되었다.

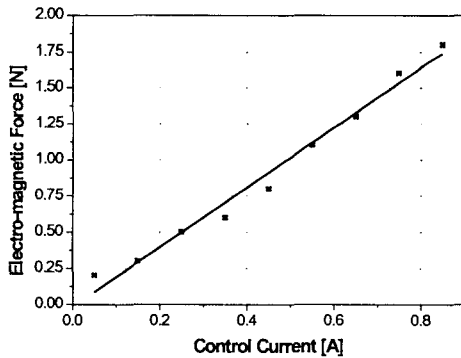


그림 4. 제어전류와 전자기력의 관계
Fig. 4 Relation between control current and electro-magnetic force

그림 4는 가동자를 설계된 PID-제어를 적용하여 공칭 공극 위치에 위치시킨 다음 가동자 측면에 하중계를 설치하여 가동자가 움직이지 못하도록 구속한 상태에서 코일에 공급되는 전류를 변화시키면서 측정된 전류와 힘의 관계를 보인다. 비교적 선형 관계를 잘 만족하며, 직선의 기울기로부터 구한 전류강성은 $K_i = 2.066 [N/A]$ 이다.

그림 5는 PID-제어로 가동자 위치를 변경하면서 각 위치에서의 측정된 코일 전류의 관계를 보인다. 공극이 양일 때와 음일 때 기울기가 서로 다를 수 있는데, 이는 좌우 전자석의 비대칭에서 기인되는 것으로 분석된다. 두 기울기

의 평균을 취하여 얻은 직선의 기울기는 $302.14 [A/m]$ 이며, 전류강성을 이용하여 얻은 위치강성은 $K_y = 624.22 [N/m]$ 이다. 공극이 영인 지점, $y=0$, 은 공칭공극 위치를 나타내며, 이 때의 전류는 바이어스 전류를 나타낸다.

표 1은 결정된 시스템의 파라미터를 보인다. 공칭공극은 $1.5mm$ 이고, 사용된 리니어스케일 센서의 분해능은 $0.1\mu m$ 이다.

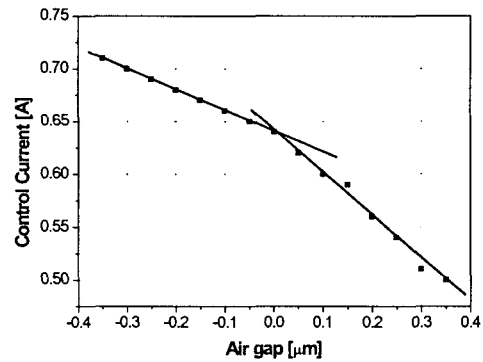


그림 5. 공극과 코일 전류의 관계
Fig. 5 Relation between air-gap and coil current

표 1. 시스템의 파라미터
Table 1 System parameters

Symbol	Parameter	Value
m	Mass	$0.5 Kg$
A	Area of pole	$8 \times 10^{-3} m^2$
I_o	Bias current	$0.65 A$
K_i	Current stiffness	$2.066 N/A$
K_y	Position stiffness	$624.22 N/m$
K_a	Amplifier gain	$0.4 A/V$
y_o	Nominal air gap	$1.5 mm$
	Distance between poles	$23.0 mm$
	Encoder resolution	$0.1 \mu m$

3. 슬라이딩 모드 제어

식 (5)의 시스템을 안정화시키고 파라미터 불확실성과 마찰에 의한 추종 오차를 줄이기 위해 슬라이딩 모드 제어를 적용한다. 슬라이딩모드 제어는 시스템의 동적 모델과 무관한 동특성을 얻을 수 있고 시스템의 불확실성이나 외란에 강인하며, 특히 마찰이 있는 시스템에서 우수한 제어 성능을 보인다. 정적 마찰에 의한 정상상태 오차를 제거하기 위해 변위의 적분이 포함된 상태변수를 다음 식과 같이 정의한다.

$$x = \left[\int e dt \quad e \quad \dot{e} \right]^T \quad (6)$$

여기서 오차는 기준위치입력과 가동자위치의 차이로 다음으

로 정의 된다.

$$e = r - y \tag{7}$$

식(6)의 정의에 따라 식(5)의 시스템을 상태공간방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + B_u u + B_a \ddot{r} + B_d \dot{r} + B_f \tag{8}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_x}{m} & 0 \end{bmatrix}, B_u = [0 \ 0 \ \frac{K_a K_i}{m}]^T, B_d = [0 \ 0 \ \frac{K_d}{m}]^T$$

$$B_a = [0 \ 0 \ -1]^T, B_f = [0 \ 0 \ \frac{1}{m}]^T$$

여기서 f 는 마찰력과 파라미터 불확실성을 포함한다. 슬라이딩모드 제어기 설계를 위해 슬라이딩 평면 $\sigma(t)$ 를 아래와 같이 정의 한다.

$$\sigma(t) = Sx(t) \tag{9}$$

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

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n(t) \tag{10}$$

여기서 $u_{eq}(t)$ 는 시스템의 상태가 슬라이딩 평면에 도달되면 그 후 항상 그 평면에 존재하도록 하는 등가제어입력(equivalent control input)이며, $u_n(t)$ 는 시스템의 상태를 슬라이딩 평면에 도달되도록 하는 불연속적 도달제어입력(reaching control input)이다.

슬라이딩 평면에서는 $\sigma(t) = \dot{\sigma}(t) = 0$ 이므로 등가제어입력은 다음과 같이 결정된다.

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

여기서 SB_u 는 비특이(nonsingular) 행렬로 가정한다.

도달제어입력은 도달법칙을 만족시켜야 되므로 다음의 Lyapunov 함수를 정의 하면

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

도달법칙은 이 함수의 도함수가 음이 되면 만족된다.

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

만일 도달제어입력을 다음과 같이 정하면,

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

식(13)은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{V}(t) = \sigma(t) \{-\phi \sigma(t) - \rho \text{sign}[\sigma(t)] + SB_f\} = -\phi \sigma^2(t) + \sigma(t) \{SB_f - \rho \text{sign}[\sigma(t)]\} \tag{15}$$

따라서 ϕ 는 양의 값을 선정하고, 만약 다음과 같은 ρ 가 존재한다면,

$$|SB_f| < \rho \tag{16}$$

식(15)의 도함수는 음이 되어 슬라이딩 평면의 도달 법칙을 만족한다. 식(16)에서 마찰력과 파라미터 불확실성을 나타내는 f 는 유한한 값을 가지므로 식(16)을 만족하는 ρ 가 존재한다. 따라서 최종적으로 결정되는 슬라이딩모드 제어기는 다음 식으로 결정된다.

$$u(t) = -(SB_u)^{-1} \{SAx(t) + SB_a \ddot{r}(t) + SB_d \dot{r}(t)\} - (SB_u)^{-1} \{\phi \sigma(t) + \rho \text{sign}[\sigma(t)]\} \tag{17}$$

위에서 부호함수는 적용시 체터링(chattering)을 야기하므로, 다음의 근사식을 이용 체터링을 방지할 수 있다[14].

$$\text{sign}[f(t)] = \frac{f(t)}{|f(t)| + \epsilon}, \epsilon > 0 \tag{18}$$

식(17)의 제어기에서 선형부를 u_L 이라 하면 다음과 같다.

$$u_L = -(SB_u)^{-1} \{SAx(t) + SB_a \ddot{r}(t) + SB_d \dot{r}(t) + \phi \sigma(t)\} \tag{19}$$

이 제어기는 일반적인 PID-제어기 형태를 갖는다. 식(8)에서 마찰을 제외한 선형모델에 식(19)의 제어를 적용할 경우 슬라이딩 함수는 다음의 특성을 갖게 된다.

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

만일 슬라이딩 평면을 규정하는 행렬 S 를 다음과 같이 설정하면

$$S = [w_n^2 \quad 2\zeta w_n \quad 1] \tag{21}$$

식(9)와 (20)에서 다음을 얻는다.

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

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

$$(s + \phi)(s^2 + 2\zeta w_n s + u_n^2) \frac{E(s)}{s} = 0 \tag{23}$$

여기서 $E(s)$ 는 오차 $e(t)$ 의 라플라스 변환이며, S 는 라프

라스 연산자이다. 식(23)으로부터 폐회로 오차 동력학은 감쇠비 ζ 와 고유진동수 ω_n 에 해당되는 한 쌍의 복소극점과 $s_3 = -\phi$ 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 슬라이딩모드제어를 그림 1의 서보 장치에 적용하여 실험하였다. 슬라이딩 모드 제어기는 표 1의 파라미터를 이용하여 설계하였다.

슬라이딩평면을 결정하는 식(21)의 행렬 S 는 감쇠비 $\zeta = 0.8$, 고유진동수 $\omega_n = 35\text{Hz}$ 로 선정하였으며, $\phi = 100$ 을 선정하였다. 따라서 슬라이딩모드제어의 선형제어부에 의한 폐루프시스템은 $s_{1,2} = -175.9 \pm j131.9$, $s_3 = -100$ 에 극점을 갖는다. 제어에서 샘플링 주파수는 2kHz로 택하였다. 제안된 제어기의 성능을 확인하기 위해 크기 $50\mu\text{m}$, 주파수 0.8Hz인 사인파를 기준위치입력으로 제공하고 슬라이딩모드 제어의 선형부만을 적용한 경우 위치오차는 그림 6과 같다. 슬라이딩모드 제어기의 선형부는 앞에서 논의한 바와 같이 PID-제어기 구조를 가지며, 이 선형제어에 의해 불안정한 제어시스템이 안정화된 것을 확인할 수 있다. 큰 위치오차가 나타나는 부분은 기준위치입력의 속도의 부호가 바뀌는 지점으로, 마찰에 의한 스탭-슬립 현상이 원인으로 분석된다. 이 때 최대 위치오차의 크기는 $4.75\mu\text{m}$ 로 나타났다.

이 가동자 응답을 기준으로 가동자의 변위, 가동자의 가속도 및 이 때의 제어입력과 표 1의 파라미터를 식(5)에 대입하여 추정한 마찰력을 가동자 변위에 따라 그리면 그림 7과 같다. 그림 7에서 점 A는 가동자의 속도가 양에서 음으로 변화되는 순간 정지상태에 해당하며, 이 때의 힘이 음의 속도에서의 정지마찰력(1.7N)이며, 이후 좌측으로 평탄하게 진행되는 지점에서의 힘이 음의 속도에서의 운동마찰력(1.4N)이 된다. 점 B에서의 힘은 음의 속도에서 양의 속도로 변화되는 순간 정지마찰력(-1.5N)이며, 이후 우측으로 평탄하게 진행되는 지점에서의 힘이 양의 속도에서의 운동마찰력(-1.2N)이 된다. 따라서 양의 속도에서의 마찰력이 음의 속도에서의 마찰력에 비해 높다고 볼 수 있다.

그림 6에서와 동일한 기준위치입력을 제공했을 때 슬라이딩모드제어 응답의 위치오차는 그림 8과 같다. 여기서 비선형 제어입력 ρ 는 앞에서 구한 마찰력보다 큰 값을 택하였으며, 식(18)의 ϵ 은 체터링이 발생하지 않는 범위에서 작은 값을 갖도록 실험적으로 조정하였다. 슬라이딩모드제어의 위치오차는 $0.8\mu\text{m}$ 로, 그림 6의 응답과 비교 비선형 제어입력에 의해 마찰에 의한 응답오차가 현저하게 감소됨을 확인할 수 있다. 이로써 슬라이딩모드제어의 마찰에 의한 위치오차의 개선 효과를 확인할 수 있다. 슬라이딩모드제어에서 나타나는 위치오차의 요인으로는 (1) 체터링을 제거하기 위해 사용한 부호함수를 근사화 오차, (2) 리니어스케일 센서의 분해능, (3) 디지털제어의 샘플링주파수 등을 들 수 있다.

유사한 실험을 기준입력의 주파수를 변경시키면서 실시하였다. 그 결과는 그림 6, 8과 유사하게 선형제어에서 나타나는 마찰에 의한 위치오차가 슬라이딩모드제어에 의해 큰 감소를 보임을 확인하였다.

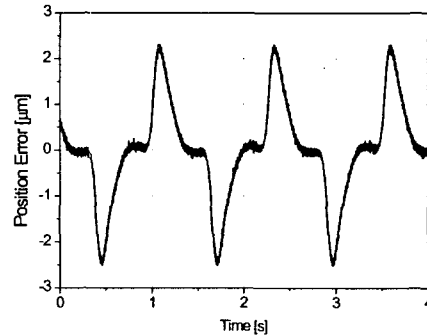


그림 6. 선형 제어시 가동자 위치오차
Fig. 6 Position error of slider by linear part of SMC

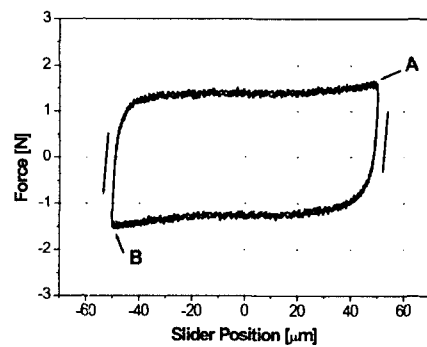


그림 7. 가동자의 위치-추정 마찰력의 관계
Fig. 7 Relation between slider position and estimated friction force

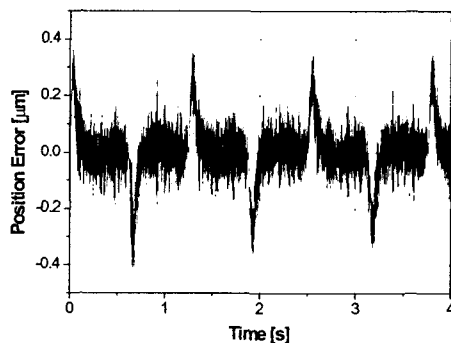


그림 8. 슬라이딩모드 제어시 가동자 위치 오차
Fig. 8 Position error of slider by sliding mode control

그림 1의 서보시스템은 리니어모터 스테이지가 갖는 진직도 오차의 보상을 목적으로 하므로, 우선 리니어 모터 스테이지의 진행방향 각 위치에서 나타나는 진직도 오차를 알아야 된다. 이 진직도 오차는 적용하려는 리니어모터 스테이지마다 다르다. 따라서 본 연구에서는 현재 적용 대상으로

하는 리니어모터 스테이지의 진직도 오차를 직접 측정하였다. 그림 9는 레이저 측정장비를 이용하여 측정한 진직도 오차로, 스테이지의 이송거리는 1760mm이며, 이송 속도를 100mm/s로 1회 왕복하면서 측정한 오차이다. 그림 9에서와 같이 중앙부를 대칭으로 나타나 전진과 후진 시의 진직도 오차는 거의 차이가 없는 것으로 확인되었으며, 이 때 오차의 크기는 최대 22.4 μm 로 측정되었다. 반복적인 실험을 통해 얻은 진직도 오차는 그림 9에 나타난 진직도 오차와 거의 차이가 없어 진행방향 각 위치에서 진직도 오차는 고정된 값을 가짐을 확인하였다.

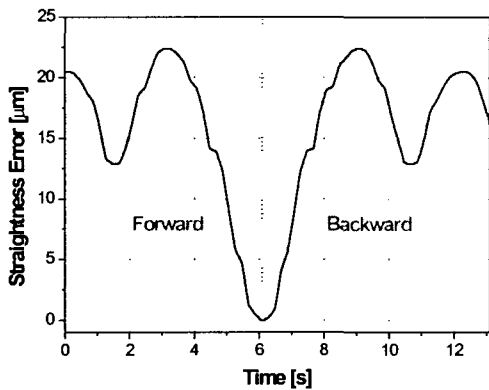


그림 9. 리니어모터의 진직도 오차 측정치
Fig. 9 Measured straightness error of a linear motor stage

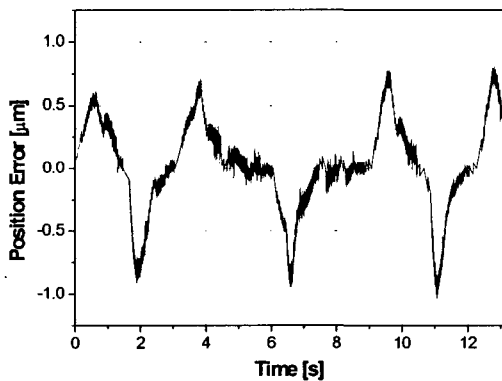


그림 10. 선형제어시 진직도 보상 오차
Fig. 10 Straightness compensation error by linear part of SMC

그림 10은 그림 9의 진직도 오차를 반전시켜 가동자 서보 시스템의 기준위치입력으로 제공하면서 제어한 경우 나타난 위치오차를 보인다. 이 때 제어기는 앞에서 설계된 슬라이딩모드제어기의 선형부만을 적용하였다. 이 경우도 기준위치입력의 기울기가 영인 지점에서 큰 오차가 발생함을 알 수 있는데, 이는 앞에서와 같이 마찰에 의한 오차임을 알 수 있다. 오차의 크기는 최대 1.77 μm 로 측정되었다. 그림 11은 위와 동일 조건에서 비선형 부분을 포함한 슬라이딩모드 제어의 응답을 보인다. 비선형 부분을 추가함에 따라 최대 위

치오차가 0.4 μm 수준으로 감소하였다. 이 오차는 사용된 리니어스케일 센서의 분해능이 0.1 μm 임에 비추어 높은 성능을 보인다고 할 수 있다.

이상의 결과로서 슬라이딩 모드 제어를 통해 최대 위치오차 요인인 마찰을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였으며, 따라서 본 연구에서 제안한 서보 시스템을 이용하여 리니어모터 스테이지의 높은 진직도 실현이 가능함을 알 수 있다.

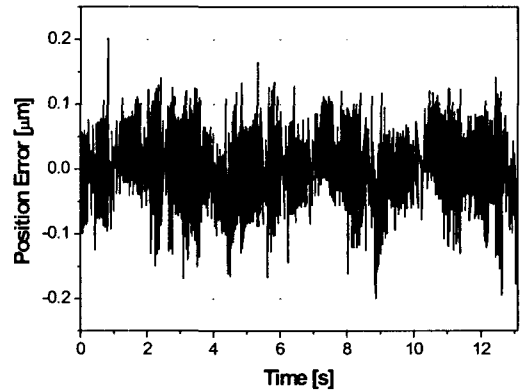


그림 11. 슬라이딩 모드 제어시 진직도 보상 오차
Fig. 11 Straightness compensation error by sliding mode control

5. 결 론

본 연구에서는 리니어모터 스테이지에서 진직도 보상을 위해 전자식 액츄에이터를 이용한 서보 시스템을 개발하였다. 이 서보 시스템에서 마찰은 주요 외란 요소로 작용함을 확인하였으며, 이 마찰에 의한 오차의 개선을 위해 슬라이딩 모드 제어를 적용하였다. 실험 결과 제안된 서보 시스템은 기존의 메커니즘에 비해 비용측면에서 저렴하며 슬라이딩 모드 제어가 마찰에 의한 오차 요소를 효과적으로 보상하여 진직도를 나노미터 수준으로 유지할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 서보 시스템을 이용하여 리니어모터 스테이지의 진직도를 향상시킬 수 있다 하겠다.

감사의 글

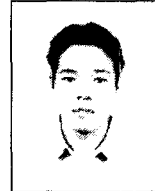
본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R01-2003-000-10857-0) 지원으로 이루어졌으며, 재단의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 권영건, 박정일, "신경회로망을 이용한 리니어 펄스 모터의 정밀제어," 제어자동화시스템공학 논문지, 제6권, 제11호, pp. 987-994, 2000.

- [2] 강민식, "자기베어링계에서 외란관측기를 갖는 슬라이딩모드 제어," 대한전기학회논문집, vol. 53D, no. 6, pp. 408-414, 2004.
- [3] B. Armstrong-Helouvry, P. Dupont, and C. Canudas, "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction," *Automatica*, vol. 30, no. 7, pp. 1083-1138, 1994.
- [4] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K.J. Astrom, and P. Lischinsky, "A new model for control of system with friction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, pp. 419-425, 1995.
- [5] P. Lischinsky, C. Canudas de Wit, and G. Morel, "Friction compensation of a schling hydraulic robot," *Proc. of the 1997 IEEE International Conference on Control Application*, pp. 294-299, 1997.
- [6] B. Bona and M. Indri, "Friction compensation and robust hybrid control," *Proc. of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 81-86, 1993.
- [7] D. Garagic and K. Srinivasan, "Adaptive friction compensation for precision machine tool drive," *Control Engineering*, vol. 12, pp. 1451-1464, 2004.
- [8] X.Z. Gao and S. J. Ovaska, "Friction compensation in servo motor systems using neural networks," *Proc. of the 1999 IEEE Midnight-Sun Workshop on Soft Computing Methods in Industrial Applications*, pp. 146-151, 1999.
- [9] C. Edwards, and S. K. Spurgeon, "Sliding Mode Control: Theory and Applications," TAYLOR & FRANCIS Inc, 2004.
- [10] V. I. Utkin, J. Guldner, and J. Shi, *Sliding mode control in electromechanical systems*, New-York : Taylor & Francis, 1999.
- [11] J. X. Xu, T. H. Lee, and Y. J. Pan, "On the sliding mode control for DC servo mechanisms in the presence of unmodeled dynamics," *Mechatronics*, vol. 13, pp. 755-770, 2003.
- [12] B. Wang, K. Gong, D. Yang, and J. Li, "Fine attitude control by reaction wheels using variable-structure controller," *Acta Astronautica*, Vol. 52, pp. 613-618, 2003.
- [13] P. Korondi, D. Young, and H. Hashimoto, "Sliding mode based disturbance compensation for motion control," *Proc. of the International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, vol. 1, pp. 73-78, 1997.
- [14] A. Kawamura, H. Itoh, and K. Sakamoto, "Chattering reduction of disturbance observer based sliding mode control," *IEEE Trans. Ind. Application*, vol. 30, pp. 456-461, 1994.

저 자 소 개



최정덕 (崔正德)

1975년 3월 21일생. 2002년 경원대학교 기계공학과 졸업. 2003년~현재 동 대학원 건축설비기계공학과 석사과정

Tel : 031)750-5532

Fax : 031)750-5532

E-mail : k-manoo@hanmail.net



강민식 (姜珉植)

1957년 8월 27일생. 1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1987년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사). 1987년-1998년 국방과학연구소. 1998-현재 경원대학교 기계공학과 부교수.

Tel : 031) 750-5524

Fax : 031) 750-5273

E-mail : mskang@kyungwon.ac.kr