

축소 모델을 이용한 마찰력의 온라인 추정 및 보상 기법

A Friction Compensation Scheme Based on the On-line Estimation with a Reduced Model

최재일, 양상식
(Jae Il Choi and Sang Sik Yang)

Abstract : The friction is one of the nonlinearities to be considered in the precise position control of a system which has electromechanical components. The friction has complicated nonlinear characteristics and depends on the velocity, the position and the time. The conventional fixed friction compensator and the controller based on linear control theory may cause the steady state position error or oscillation. The plant to be controlled in this study is a positioning system with a linear brushless DC motor(LBLDCM). The system behaves like a 4th-order model including the compliance and the friction. In this study, the plant model is simplified to a 2nd-order model to reduce the computation in on-line estimation. Also, to reduce the computation time, only the friction is estimated on-line while the mass and the viscous damping coefficient are fixed to the values obtained from off-line estimation. The validity of the proposed scheme is illustrated with the computer simulation and the experiment where the friction is compensated by using the estimation.

Keywords : LBLDCM(linear brushless DC motor), friction compensation, on-line parameter estimation

I. 서론

위치 정밀도가 10 μm 정도인 위치 결정 기구는 대개 drive train에 커플링과 ball-screw를 사용하므로 콤프라이언스, 마찰력, 백래쉬 및 구동기 포화 등의 비선형 요소가 존재한다. 이러한 요소들로 인하여 ball-screw 방식의 위치 결정 기구로는 정밀 위치 제어가 불가능하다. 위치 정밀도가 10 μm 이하인 정밀 위치 제어시에는 linear brushless DC motor(LBLDCM)를 이용하여야 하고, 위치 결정 기구 자체가 정밀 가공 및 조립으로 제작되어야 한다. 이러한 시스템은 백래쉬가 없으며 제어를 적절히 동조함으로써 구동기 포화를 없앨 수 있다. 또한 마찰력과 콤프라이언스가 무시할만큼 작으나 정밀 위치 제어시에는 간과할 수 없는 문제로 작용한다.

마찰력은 복잡한 비선형 특성을 나타내며, 이를 무시하고 제어기를 설계하였을 경우 정상 상태 오차 및 섭동을 유발한다.[1] 본 연구에서 사용한 LBLDCM 위치 결정 기구도 마찰력 보상 없이 PD 제어기로 위치 제어를 수행하였을 경우 30~40 μm 정도의 정상 상태 오차가 발생했으며 마찰력이 위치 및 운동 방향에 따라 달라짐을 실험을 통하여 확인하였다. 이러한 마찰력을 보상하기 위하여 비선형 제어기를 이용한 보상 기법[2], Impulse 보상 기법[3], 고정 보상 기법[4], 적응 보상 기법[5][6] 등 다양한 보상 기법이 제안되었다. 비선형 제어기를 이용한 보상 기법은 기준 위치 부근에 도달하게 되면 제어기의 이득을 키워줌으로써 원하는 구동기 출력력을 얻는 방법이다. 그러나 이 방법은 정상 상태 오차가 존재하며 정상 상태 오차를 줄이기 위해 제어기 이득을 키우게 되면 limit cycle이 존재하게 되고 시스템의 안정성을 보장할 수 없게 된다. Impulse 보상 기법은 구동기에 정지 마찰력보다 큰 입력을 짧은 시간 동안 가하면 일정한 작은 변위만큼 이동하는 성질을 이용한 방법이다. 이 방법은 매우 정밀한 위치 제어를 할 수 있지만 구동기에 한번의 펄스를 가하고 정지시까지 기다린 후, 다음 동작을 결정하

기 때문에 일정한 오차 이내로 수렴하기까지 오랜 시간이 소요되는 단점이 있다. 고정 보상 기법은 미리 정하여진 마찰력 모델의 변수를 실험 등의 방법으로 오프라인으로 추정하여 이에 해당하는 고정된 값을 매 순간 제어 입력에 추가하는 방법이다. 이 방법은 가장 흔하게 행하여지는 방법이며 사용되는 마찰력 모델에 따라서 여러 종류로 나누어진다 [1]. 그러나 고정 보상 기법은 추정된 마찰력 변수에 오차가 없다는 가정하에 시스템의 안정성 및 그 성능이 보장된다. 적응 보상 기법은 마찰력 모델의 변수를 온라인으로 매 순간 추정하여 보상하는 방법이다. [5]에서는 재귀적 최소자승법(Recursive Least Square Estimation Algorithm)을 이용하여 운동부의 질량과 점성 마찰력, 운동 마찰력을 추정한 후, 질량을 추정된 값으로 고정시키고 점성 마찰력과 운동 마찰력을 추정, 보상하였다. [6]은 [5]와 기본적인 구조는 같지만 마찰력 추정 모델이 다르다는 차이가 있다. 적응 보상 기법은 마찰력의 비선형성, 위치 의존성 및 시변 특성을 감안할 수 있지만 모델이 복잡해지고 추정할 변수가 많아지면 연산 시간이 길어진다는 단점이 있다.

본 연구에서는 비선형 특성을 가지는 마찰력의 온라인 적응 보상을 수행하도록 한다. 추정 변수를 줄이기 위하여 LBLDCM 위치 결정 기구의 마찰력과 콤프라이언스를 고려한 4계 플랜트 모델을 2계 추정 모델로 간략화하여 추정하였으며, LBLDCM 위치 결정 기구의 정지 마찰력과 운동 마찰력의 차이가 크지 않음을 실험을 통하여 확인하였으므로 운동 마찰력만을 추정하도록 한다. 또한 계산량을 줄이기 위하여 PRBS(Pseudo Random Binary Signal) 입력하에서 추정된 LBLDCM 위치 결정 기구 운동부의 질량과 점성 마찰 계수를 추정된 값으로 고정시킨 후, 위치 제어시에는 운동 마찰력만을 온라인으로 추정하여 보상하도록 한다.

II. LBLDCM 위치 결정 기구의 비선형 모델

본 연구에서 사용된 LBLDCM 위치 결정 기구는 그림 1과 같으며, 출발 및 정지시의 운동부와 베어링의 진동을 고려하여 4계 모델이 제안되었다[7]. LBLDCM 위치 결정 기구의 출발시와 정지시에 진동 현상을 볼 수 있으며 LBLDCM 위치 결정 기구에 3 V의 크기를 갖는 펄스 입력을 2

ms동안 가하면 그 응답은 그림 2과 같이 4계 모델의 감쇠 특성을 나타낸다. 이 현상은 LBLDCM 위치 결정 기구의 운동부를 지지하고 구면내에서 구름 운동을 하는 베어링에 의해 발생한다고 생각된다. 본 논문에서는 그림 2의 응답에서 50 ms 이전에서 보이는 약 50 Hz의 진동과 마찰력에 의한 감쇠를 고려한 4계 모델을 세우고 모의 실험에서 플랜트의 모델로 사용한다. 50 ms 이후에 나타나는 진폭이 약 1 μ m 인 8 Hz의 진동모드는 본 논문의 위치 제어시 고려하지 않으며, 이로 인한 진동은 위치 오차로 허용한다.

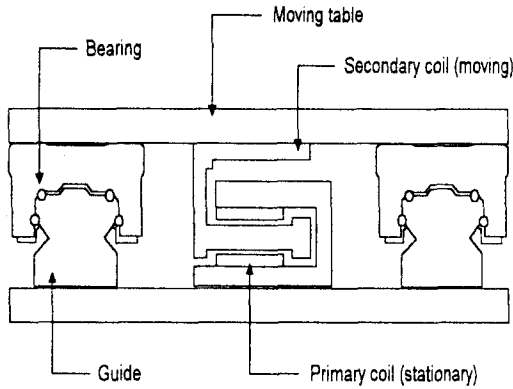


그림 1. LBLDCM 위치 결정 기구의 단면도.
Fig. 1. The cross-sectional diagram of the LBLDCM positioning stage.

모의 실험에서 사용하는 4계 모델은 그림 3(a)와 같고 자유 물체도 그림 3(b)와 같다. 이 시스템에 대한 운동 방정식은

$$M_1 \ddot{x}_1 = u - K_{eq}(x_1 - x_2) - B_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (1)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 = K_{eq}(x_1 - x_2) + B_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - B_2 \dot{x}_2 - f \quad (2)$$

이다. 여기서 M_1 은 모터를 포함하는 선형운동부의 질량이고, M_2 는 가이드와 선형 운동부 사이의 베어링의 등가질량(회전운동을 직선운동으로 전환하는 경우)이며, B_{12} , B_2 는 각각 내부와 외부의 점성마찰이고, f 는 M_2 에 작용하는 마찰력, K_{eq} 는 두 질량사이의 콤플라이언스를 나타내는 상수이다. 또, 입력, u 는 질량 M_1 에 작용하며, x_1 이 위치 결정 기구의 위치를 나타내는 출력 변수이다.

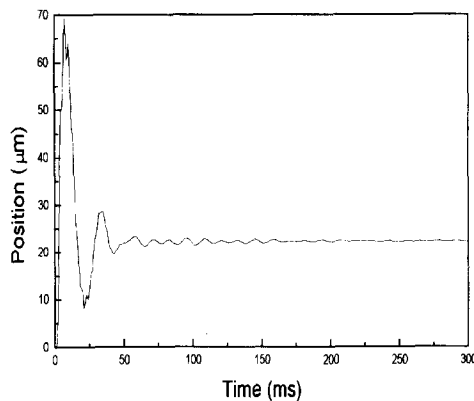


그림 2. LBLDCM 위치결정기구의 펄스 응답.
Fig. 2. The pulse response of the LBLDCM positioning system.

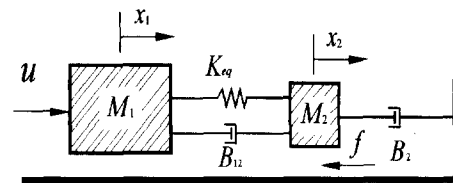
비선형 마찰력의 모델로는 여러가지가 있지만 본 논문에서는 그림 4와 같은 모델을 사용한다. 이를 정지 마찰력, f_s 와 운동 마찰력, f_d 로 나타내면,

$$f = \begin{cases} f_s \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) & \dot{x}_2 = 0, |\dot{x}_2| > f_s \\ f_2 & \dot{x}_2 = 0, |\dot{x}_2| \leq f_s \\ f_d \operatorname{sgn}(\dot{x}_2) & \dot{x}_2 \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

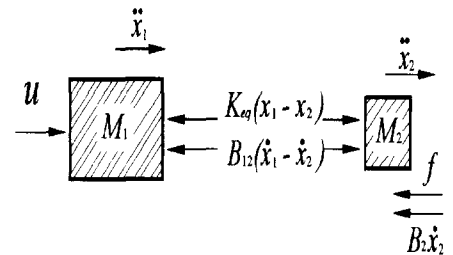
이다. 여기서 $f_2 = K_{eq}(x_1 - x_2) + B_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - B_2 \dot{x}_2$ 이고, 운동 마찰력, f_d 는 속도에 대한 지수 함수로 모델링하는 것이 보편적이며

$$f_d = (f_s - f_c) e^{-\frac{|\dot{x}_2|}{v_c}} + f_c \quad (4)$$

로 나타낸다. 여기서 f_c 는 쿨롱 마찰력, v_c 는 윤활 조건이나 접촉면의 특성에 따른 속도 상수이고, v 는 운동부의 속도, 즉 \dot{x}_2 이다. 이 마찰력 모델은 3장의 모의 실험에서 플랜트의 마찰력 계산시 사용된다.



(a)



(b)

그림 3. LBLDCM 위치 결정 기구.

(a) 2자유도 시스템,

(b) 자유 물체도.

Fig. 3. The 4th-order model of the LBLDCM positioning system.

(a) The two-degree-of-freedom system,

(b) The free body diagram.

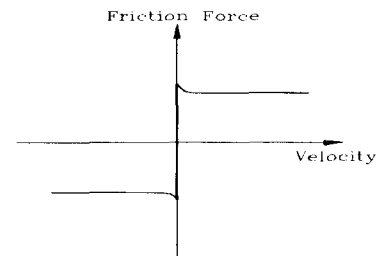


그림 4. 마찰력 모델.

Fig. 4. Friction model.

LBLDCM 위치 결정 기구의 계단 및 펄스 응답을 관측하면 그림 3의 변수들을 구할 수 있다. LBLDCM 위치 결정 기구가 정속으로 운동할 경우에는 진동 현상이 나타나지 않고 질량과 점성 마찰력에 의해 기술되는 2계 모델로 볼 수 있기 때문에 점성 마찰 계수, B_2 가 지배적으로 나타난다. 이 경우에는 K_{eq} 와 B_{12} 는 시스템의 운동에 영향을 주지 못

한다. 그러나 LBLDCM 위치 결정 기구가 출발하거나 정지할 때에는 B_2 보다는 K_{eq} 와 B_{12} 가 진동 운동에 지배적인 역할을 한다.

III. 축소모델을 이용한 매개 변수 및 마찰력 추정

적용 보상 기법은 마찰력 모델의 변수를 실시간으로 매순간 추정하여 보상하는 방법이다. 이 방법은 마찰력의 비선형성, 위치 의존성 및 시변 특성을 감안할 수 있다는 장점이 있지만 모델이 복잡해지고 추정할 변수가 많아지면 연산 시간이 길어진다는 단점이 있다. 또, 본 연구에서와 같이 x_2 를 측정할 수 없는 경우에 4계 모델을 사용한 마찰력 추정은 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 x_1, x_2 사이의 상대 운동이 작다고 가정하여 매개변수 추정 모델은 (5)와 같이 2계 모델로 간략화 시키고, 운동부의 질량, M 과 점성 마찰 계수, B , 마찰력, f 만을 추정하도록 한다.

$$M\ddot{x} = u - B\dot{x} - f \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (5)$$

시변 특성을 가지는 마찰력을 추정하기 위해서 지수 함수적인 망각 인자를 이용한 재귀적 최소 자승법을 이용하며, 추정 변수가 참값으로 수렴하기 위해서는 초기치 문제, 외란, 여기(Excitation) 조건 등을 고려하여야 한다[8][9].

3.1 재귀적 최소 자승법

최소 자승법은 시스템의 입력력 신호로부터 미지의 변수를 추정하는 것을 근본으로 한다. 따라서 추출 가능한 입출력 신호와 미지의 변수로 구성되는 다음 (6)과 같은 추정 모델을 설정한다.

$$u = \theta^T \varphi \quad (6)$$

여기서 u 는 입력 힘, θ 는 미지의 변수를 나타내는 벡터, φ 는 시스템의 출력 신호로 구성되는 벡터이다. (5)와 같은 2계 모델의 실시간 변수 추정을 위하여 (7)과 같이 입력 오차를 정의한다.

$$e = u - \hat{\theta}^T \varphi \quad (7)$$

여기서,

$$\hat{\theta}^T = [\hat{M} \quad \hat{B} \quad \hat{f}]$$

$$\varphi = [\ddot{x} \quad \dot{x} \quad \operatorname{sgn}(\dot{x})]^T$$

이다. 여기서 $\hat{M}, \hat{B}, \hat{f}$ 은 추정 변수이고, \ddot{x} 은 가속도, \dot{x} 은 속도이다.

PAA(Parameter Adaptation Algorithm)는 다음과 같다 [8].

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + R(k)(u(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)) \quad (8)$$

$$R(k) = P(k-1)\varphi(k)(\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k))^{-1} \quad (9)$$

$$P(k) = (I - R(k)\varphi^T(k))P(k-1) \quad (10)$$

여기서, λ 는 망각 인자(forgetting factor)로 $0 < \lambda \leq 1$ 인 값을 가지며 $\lambda=1$ 이면 표준 최소 자승법이 된다.

3.2. 모의실험에 의한 변수 추정

정확한 변수 추정을 위하여 시스템의 입력 신호로 풍부한 주파수 성분을 포함하고 있는 그림 5와 같은 PRBS(Pseudo Random Binary Signal)를 사용하였다. PRBS 입력의 주기는 시스템의 시상수를 고려하여 800 ms으로 하였고 크기는 ± 1 V로 하였다[9]. 망각 인자, λ 는 변수의 수렴성이 좋도록 1로 하였고 추정 변수의 초기치는 0, 적용 이득의 초기치, $P_0=500I_{3 \times 3}$ 로 하였다. 먼저 변수 추정 성능을 확인하기 위하여 2계 플랜트를 2계 추정 모델로 추정한 모의실험 결과를 그림 6에 보인다. 모의실험에 사용된 플랜트 변수 값

은 표 1과 같으며, 추정된 $\hat{M}, \hat{B}, \hat{f}$ 은 각각 3.4 kg, 47 Ns/m, 2.3 N이다. 두 값들이 거의 일치하므로 변수 추정 알고리즘의 성능이 양호함을 알 수 있다.

4계 플랜트 모델에 대해서 2계 추정 모델을 사용한 모의실험 결과를 그림 7에 보인다. 플랜트 변수 값은 표 2와 같고, 추정된 $\hat{M}, \hat{B}, \hat{f}$ 은 각각 3.4 kg, 46 Ns/m, 2.1 N이다. 시스템 입력 및 사용된 마찰력 모델은 위의 경우와 같다. 모의실험 결과, 추정된 운동부의 질량, \hat{M} 은 M_1 값과 거의 같다. 추정된 점성 마찰 계수, \hat{B} 은 B_{12} 와 B_2, K_{eq} 등의 성질이 복합되어 나타나는 것으로 B_2 에 근사한 값으로써 B_2 보다는 작은 값을 가진다. 또한 추정된 마찰력, \hat{f} 은 쿨롱 마찰력, f_c 보다 약간 작은 값을 갖는다. 모의실험 결과 LBLDCM 위치 결정 기구의 4계 플랜트에 대한 2계 추정 모델로의 변수 추정이 유효함을 알 수 있다.

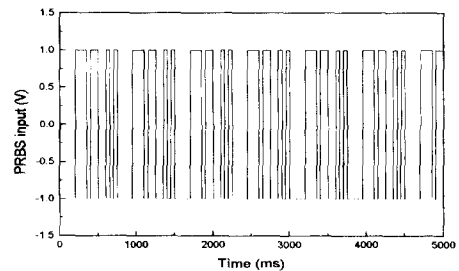


그림 5. PRBS 입력.
Fig. 5. The PRBS input.

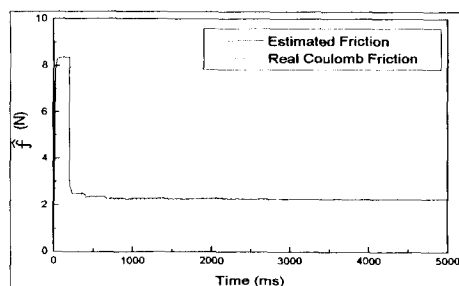
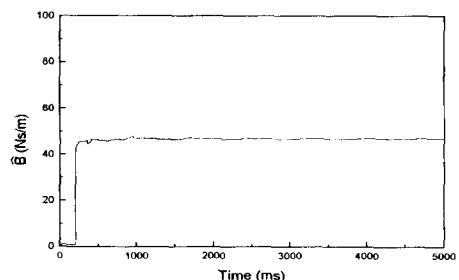
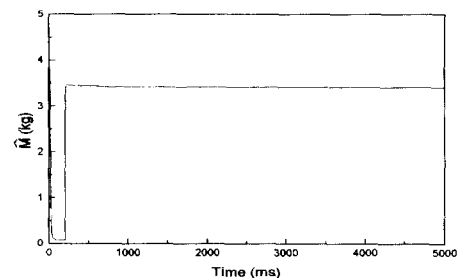


그림 6. 2계 플랜트의 변수 추정 모의실험 결과.
Fig. 6. The simulation results of the parameter estimation for the 2nd-order plant.

표 1. 2계 플랜트에 사용된 매개 변수 값.

Table 1. The parameter value of the 2nd-order plant.

parameter	values
M	3.5 kg
B	49 Ns/m
f_s	2.83 N
f_c	2.27 N
v_c	0.005 m/s

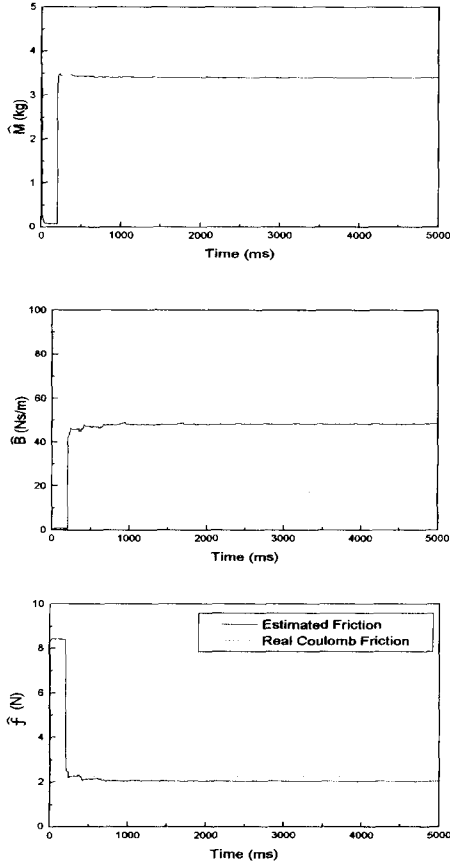


그림 7. 4계 플랜트의 변수 추정 모의실험 결과.

Fig. 7. The simulation results of the parameter estimation for the 4th-order plant.

표 2. 4계 플랜트에 사용된 매개 변수 값.

Table 2. The parameter value of the 4th-order plant.

parameter	real values
M_1	3.5 kg
M_2	0.35 kg
B_{12}	550 Ns/m
B_2	55 Ns/m
ζ	0.25
ω_n	314 rad/s
K_{eq}	3.45×10^5 N/m
f_s	2.83 N
f_c	2.27 N
v_c	0.005 m/s

3.3. 실험에 의한 변수 추정

실험에 사용된 시스템 입력 및 기타 조건은 모의실험과 동일하다. 위치 궤환은 ZYGO AXIOM 2/20 레이저 간섭계를 사용하였으며 486 DX2-66 MHz PC, 16 bit D/A 변환기와 AMC Brushless PWM Servo Amplifier를 사용하였다. 샘플링 주기는 1 ms이다.

실험 결과를 그림 8에 보인다. 추정된 운동부의 질량, \hat{M} 은 3.5 kg이고 추정된 점성 마찰 계수, \hat{B} 은 49 Ns/m, 추정된 운동 마찰력, \hat{f} 은 2.27 N이다. 이 실험 결과와 그림 7의 4계 플랜트 모델의 변수 추정 모의실험 결과가 거의 일치하므로 이 4계 플랜트 모델을 LBLDCM 위치 결정 기구의 위치 제어 모의실험에 사용한다.

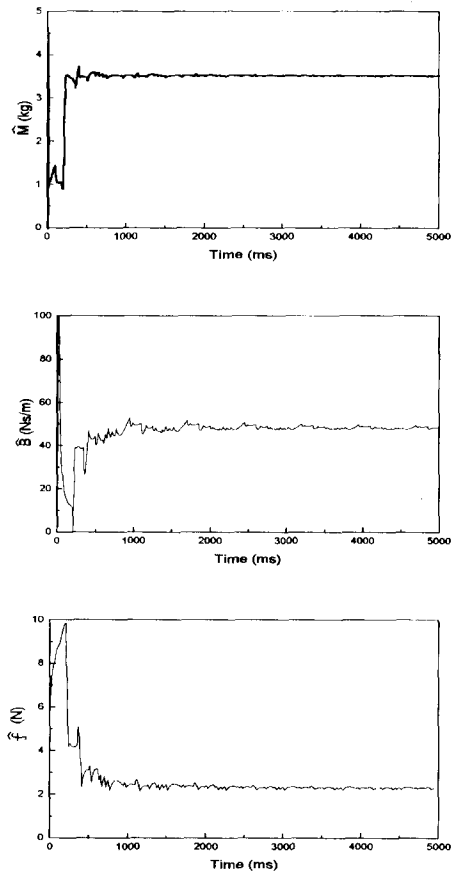


그림 8. 변수 추정 실험 결과.

Fig. 8. The experimental results of the parameter estimation.

IV. 제어기의 구성 및 마찰력 추정기

PID 제어기는 산업 현장에서 가장 많이 쓰이는 대표적인 제어기이다. 그 구조의 간단함에도 불구하고 대부분의 제어 대상에 대하여 좋은 성능과 여러 잡음에 강인한 특성때문에 거의 모든 분야에서 실질적인 제어기로써 애용되어 왔다. 그러나 이러한 PID 제어기는 기본적으로 선형 제어기이며, 따라서 선형, 특히 4계 이하의 제어 대상에 대해서만 원하는 성능과 안정성이 보장된다.

더구나 마찰력이 존재하는 제어 대상의 경우 이러한 PID 제어기가 사용될 경우 정상 상태 위치 오차가 발생하게 되고 이 때 정상 상태 위치 오차를 줄이기 위하여 적분 이득을 높이면 목표 위치 부근에서 limit cycle이 존재하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 대부분의 공작 기계 등에서는 적분항을 없앤 PD 제어기를 사용하나, 이러한 PD 제어기는 마찰력에 의해서 정상 상태 위치 오차가 발생하게

된다. 따라서 본 연구에서는 적분항을 없앤 PD 제어기의 출력에 실시간으로 추정된 마찰력에 해당하는 보상 입력을 더하는 방식을 사용한다[5]. 전체 제어기의 구성은 그림 9와 같다. 그림 9에서 K 는 LBLDCM 위치 결정 기구의 제원과 증폭기의 이득에서 구할 수 있으며, 여기서는 8.49 N/V이다. 추정된 마찰력 보상을 포함하는 PD제어기의 출력, u_c 는

$$u_c = (K_p + K_d s)(x_r - x_1) + \frac{1}{K} \hat{f} \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1) \quad (11)$$

으로 계산된다. 여기서, x_r 는 위치 지령이고, K_p 와 K_d 는 각각 비례 및 미분 제어기의 이득이다. 마찰력 추정을 위하여 (7)의 M 과 B 를 3.3절에서 얻어진 값으로 고정시키고, 추정 변수를 한개로 줄인 (12)와 같은 오차를 사용한다.

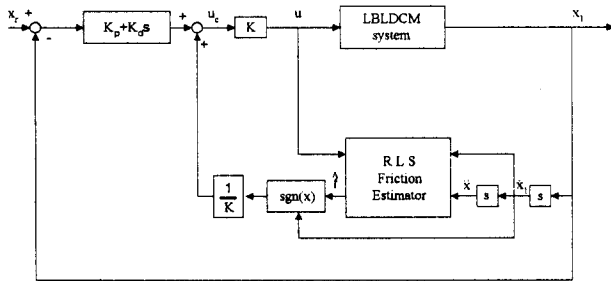


그림 9. 전체 제어 시스템의 블록다이어그램.

Fig. 9. The block diagram of the control system with the friction estimator and the compensator.

$$e = u - M\ddot{x}_1 - B\dot{x}_1 - \hat{\theta} \varphi \quad (12)$$

여기서,

$$\hat{\theta} = \hat{f}$$

$$\varphi = \text{sgn}(\dot{x}_1)$$

PAA는 (8)-(10)과 동일하다.

V. 위치 제어 모의실험 및 실험

LBLDCM의 위치 제어 모의 실험에서는 질량, M 과 점성 마찰 계수, B 를 추정된 값, 3.5 kg과 49 Ns/m로 고정시킨 후 마찰력, f 를 추정하여 마찰력 보상을 수행하였다. PD 제어기의 비례 이득, K_p 는 9.77×10^3 V/m, 미분 이득, K_d 는 39.1 Vs/m이다. 이 값들은 rising time을 3초 이내로 하고, 감쇠인자를 0.707보다 크게 하고, peak overshoot를 30% 이하로 하는 페루프 극점을 같도록 근궤적에서 정하고, 모의 실험과 실험을 통하여 시행 착오법으로 적절히 조정하였다. 마찰력의 시변 특성 및 시스템 조건에 따라 변화하는 특성을 고려하여 망각 인자, $\lambda = 0.98$ 로 하여 변수의 추정에 용이하도록 하였다. 또, 실험은 마찰력을 보상하지 않는 경우와 오프라인 추정에 의한 고정값 보상의 경우 및 온라인 추정에 의한 보상의 경우 등에 대하여 여러번 수행하였다. 모의 실험 및 실험에 사용된 위치 지령은 최대 속도 0.5 m/s, 최대 가속도 1 m/s²의 사다리꼴 속도 지령을 적분한 형태로 최종 목표 위치는 0.1 m이다. 표 3에 수행한 모의 실험 및 실험 조건을 나타내었다. 실험에 사용된 제어기 이득 및 기타 조건들은 모의 실험과 같다. 그림 10에 2계 추정모형을 이용한 마찰력 추정 및 보상기가 있는 4계 플랜트에 대한 위치 제어 모의 실험 결과를 보인다. 첫번째 그림에서 위치 지령과 위치 응답이 겹쳐 보이며 다음 그림들은 위치 오차, 제어 입력, 보상시 사용한 추정 마찰력 등 이다. 그림 11에 마찰력 보상을 행하지 않고 PD 제어기만으로 위치 제어를 수행한 실험 결과를 보인다. 30~40 μ m 정도의 정상 상태 오차가 발생함을 볼 수 있다. 위치 응답은 그림 10의 첫번째

째 그림과 차이점을 식별하기 어려울 정도로 유사하기 때문에 생략하였다. 3.3절에서 추정된 마찰력값, 2.27 N을 보상 크기로 고정시키고 \dot{x}_1 의 부호에 따라 보상한 결과를 그림 12에 보인다. 정상 상태 오차와 진동이 발생하는 것을 볼 수 있다. 적응 마찰력 보상을 한 경우의 실험 결과를 그림 13에 보인다. 20회 반복 실험 결과 정상 상태 위치 오차가 8 μ m 정도로 위치 제어 성능이 개선되었으며 그림 12의 고정 보상의 경우와 같은 큰 진동은 발생하지 않는다. 이러한 정상 상태 오차는 목표 위치 근처에 도달한 후 정지 상태에 이르기 전의 미세한 진동모드로 인하여 마찰력 추정이 정확하게 이루어지지 않아서 발생하는 것으로 생각된다.

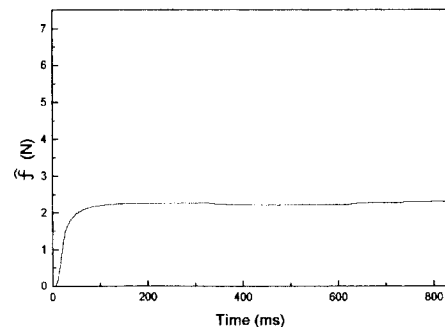
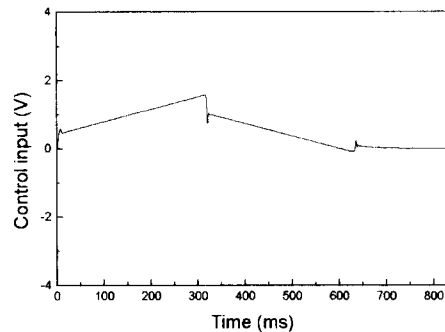
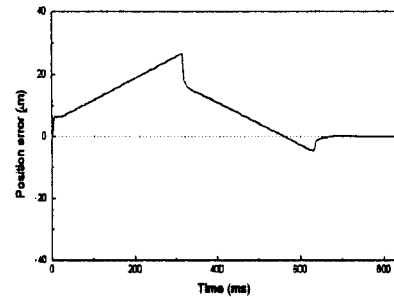
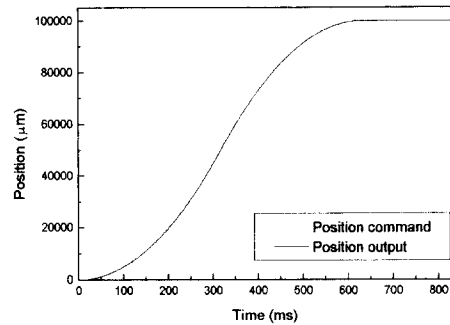


그림 10. 적응 마찰력 보상기가 있는 위치 제어 모의 실험 결과.

Fig. 10. The simulation results of the position control with the on-line friction compensator.

표 3. 위치제어 모의실험 및 실험 조건.

Table 3. The condition of the simulation and experiment of the position control.

Items	Figure number	Compensation
Simulation	Fig. 10	On-line
Experiment	Fig. 11	None
	Fig. 12	Off-line
	Fig. 13	On-line

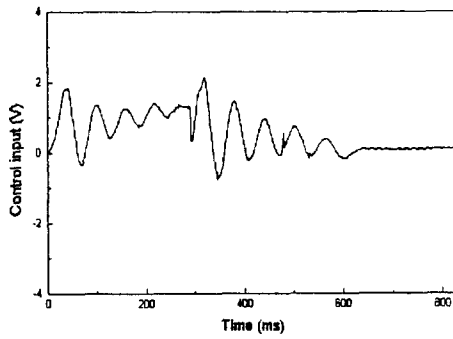
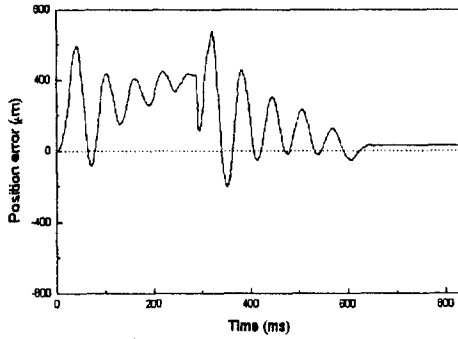


그림 11. 마찰력 보상기 없는 위치 제어 실험 결과.
Fig. 11. The experimental results of the position control without friction compensator.

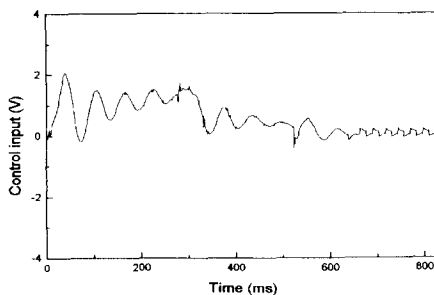
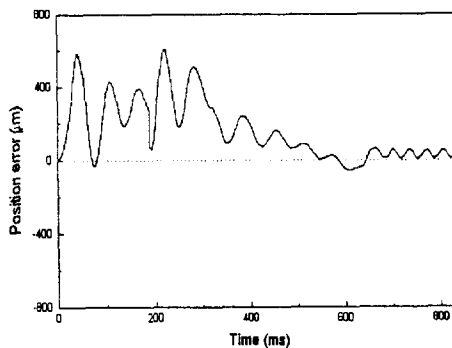


그림 12. 고정 마찰력 보상기가 있는 위치 제어 실험 결과.

Fig. 12. The experimental results of the position control with the off-line friction compensator.

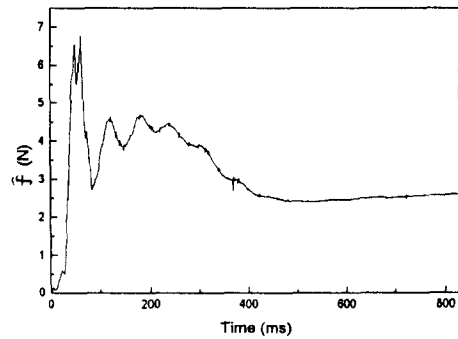
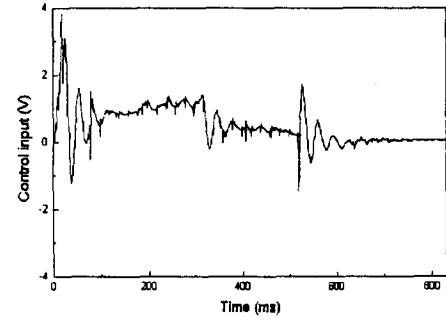
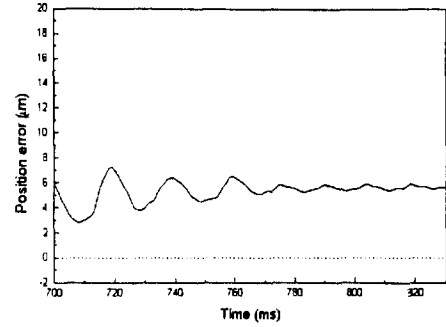


그림 13. 적응 마찰력 보상기가 있는 위치 제어 실험 결과.

Fig. 13. The experimental results of the position control with the on-line friction compensator.

VI. 결론

실험을 통하여 LBLDCM 위치 결정 기구가 마찰력이 존재하는 4계 모델을 확인하였고, 모의 실험을 통하여 2계 추정 모델로 마찰력 및 변수 추정이 가능함을 보였다.

오프라인으로 추정된 LBLDCM 위치 결정 기구 운동부의 질량 및 점성 마찰 계수를 추정된 값으로 고정시키고 속도, 위치, 운동의 방향 및 시간에 따라 변하는 마찰력만을 온라인으로 추정, 보상하였다. 그 결과 기존의 PD 제어기 및 운동 마찰력 고정 보상기를 사용한 경우보다 좋은 성능을 확인하였다.

추후 위치 정밀도를 높이기 위해서 정확한 마찰력 추정 방법이 필요하다. 이를 위해서 더욱 정밀한 마찰력 모델을 바탕으로한 마찰력의 추정을 수행하는 것과 목표 위치 도달 후 시스템 입출력 신호가 작아졌을 때의 정밀한 마찰력 추정 방법도 필요하다. 또한 높은 속도 및 가속도에서 구동기 포화로 인해 발생하는 문제에 대처할 수 있는 추정 방법도 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

[1] B. Armstrong, *Control of Machines with Friction*, Kluwer Academic Press, pp. 7-21, 1991.

[2] 김사열, "기계적 비선형 요소 존재시의 정밀 위치 제어," 아주대학교 석사학위 논문, 1991.

[3] S. Yang, M. Tomizuka, "Adaptive pulse width control for precise positioning under influence of stiction and coulomb friction," *Proc. of the American Control Conference*, vol. 1, pp. 188-193, 1987.

[4] S. Yang, "A stable friction compensation scheme for motion control systems," *대한기계학회 논문집* vol. 6, no. 2, pp. 95-100, 1992.

[5] C. Canudas de Wits, K. J. Åström, "Adaptive friction compensation in robot manipulator ; Low velocities," *IEEE Proc. Int. Conf. on Robotics and Au-*

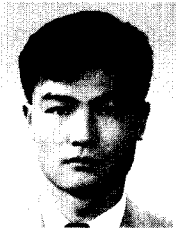
tomation, pp. 1352-1357, 1989.

[6] C. Canudas de Wits, K. J. Åström, K. Brown, "Adaptive friction compensation in DC motor drives," *IEEE J. of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 6, pp. 681-685, 1987.

[7] 양상식, 최재일, 조용대, "정밀위치제어를 위한 리니어 모터 시스템의 모형화," 제3회 G7 첨단생산시스템 workshop, pp. 783-792, 1995.

[8] K. J. Åström, B. Wittenmark, *Adaptive Control*, Addison-Wesley, pp. 58-99, 1989.

[9] I. D. Landau, *System Identification and Control Design*, Prentice Hall, pp. 145-148, 1990.



최재일

1994년 아주대학교 제어계측공학과 졸업. 동대학원 석사(1996), 1996년 현대자동차 입사. 현재 현대자동차 승용차 시 설계응용팀 근무. 관심분야는 비선형 제어.



양상식

1980년 서울대 기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1983), U.C. 버클리 박사(1988). 1989 ~ 현재 아주대학교 전기 전자공학부 부교수. 관심분야는 비선형 제어, motion control, MEMS.