

정밀위치 제어를 위한 리니어모터 위치결정기구의 모형화 및 매개변수 추정

*정일균, 양상식
아주대학교 전기전자공학부

Modeling and Parameter Estimation of Linear Motor Positioning S for Precision Positioning Control

*I. K. Jung, S. S. Yang
School of Electrical and Electronics Engineering, Ajou Univ.

Abstract - In linear motor positioning systems, nonlinearities such as friction and cogging exist. These inner system with compliance may cause the steady state error and oscillation. So it is necessary to consider these elements for precision positioning control. In this paper, a nonlinear model of a linear motor positioning system including the friction, cogging and compliance is proposed. The parameters of the proposed model are identified by recursive least-squares method. The validity of the proposed model is confirmed by computer simulation.

이러한 영향을 제거하기 위해 마찰력과 코깅토크의 해석 및 모델링을 위해 많은 연구들이 진행되어왔다. Armstrong은 마찰력의 정역학모형을 제안하였으며[1], Canudas등은 마찰력의 동역학모형을 제안하였다[2]. 마찰력은 운동의 방향, 속도, 위치, 부하에 영향을 받으며 시변요소를 포함하고 있다[1]. Ackermann등은 영구자석의 배치와 영구자석 사이의 자속분포를 해석하여 코깅의 모형을 제안하였다[3][4].

본 논문에서는 리니어브러시리스직류모터와 레이저 변위측정시스템으로 구성된 위치결정기구의 마찰력과 코깅을 고려한 비선형 모형을 제안하고 실험결과로부터 recursive least-squares 방법으로 위치결정기구의 매개변수를 추정한다. 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 모델의 타당성을 확인한다.

1. 서 론

전자부품의 소형화 및 반도체의 고집적화에 따라 조립 및 검사시 정밀 위치제어시스템이 필요하다. 이러한 정밀가공을 위해서는 가공기구의 위치 결정 정밀도가 개선되어야 한다. drive train에 커플링과 ball-screw를 사용하는 위치결정기구에는 콤파라이언스, 마찰력, 백래쉬 및 구동기 포화 등의 비선형 요소가 존재한다. 이러한 요소들로 인하여 운전중과 정지시에 진동이 발생하여 고속화가 어렵고 정밀 위치제어가 불가능하다. 위치 정밀도가 1 μ m 이하로 되기 위해서는 리니어브러시리스직류모터를 이용해야 하고, 위치결정기구 자체가 정밀가공 및 조립으로 제작되어야 한다. 이러한 시스템은 백래쉬가 없고, ball-screw type에 비해서 콤파라이언스와 마찰력이 무시할 만큼 작지만 영구자석에 의한 코깅토크가 존재한다. 정밀 위치제어시에는 이러한 비선형 요소들을 고려해야 한다.

정밀위치제어시에 마찰력과 코깅토크는 오버슈트, 위치오차, 진동등을 유발하는 주 원인이 되며,

2. 리니어모터 위치결정기구의 모형

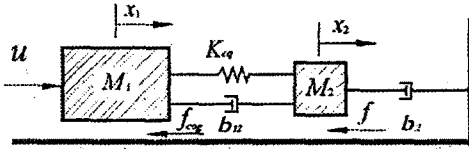
모터가 정속으로 운동할 때에는 진동이 없지만 출발과 정지시에는 진동이 나타난다. 이 현상은 운동부를 지지하고있는 볼베어링의 진동운동에 의해 발생한다. 볼베어링과 운동부의 진동모형을 2자유도 등가 시스템으로 나타내면 그림 1(a)와 같고 자유물체도는 그림 1(b)와 같다. 마찰력은 볼베어링에 작용하고, 코깅토크는 운동부에 작용한다. 이 시스템의운동방정식은

$$M_1 \ddot{x}_1 = u - k_{eq}(x_1 - x_2) - b_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - f_{cog} \quad (1)$$

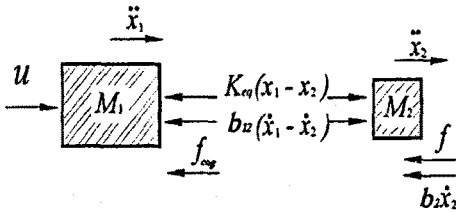
$$M_2 \ddot{x}_2 = k_{eq}(x_1 - x_2) + b_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - b_2 \dot{x}_2 - f \quad (2)$$

이다. f_{cog} 는 코깅, f 는 마찰력을 나타낸다. u 는 제어입력전압, M_1, M_2 는 제어입력전압에 대한 운동부와 볼베어링의 등가질량이고, b_{12}, b_2 는 등가선형 점성마찰계수, k_{eq} 는 등가용수철상수이다. 제어입력전압을 구동력으로 나타냈으므로 마찰력과 코깅토크는 전압으로 나타내어진다. 모터의 정속운동시에는 b_{12} 와 k_{eq} 는 운동에 영향을 미치지 못하고 b_2 가

지배적으로 나타난다. 출발과 정지시에는 b_2 보다 b_{12} 와 k_{eq} 가 지배적으로 나타난다.



(a) 2자유도계 시스템



(b) 자유물체도

그림 1. 등가 진동모형

3. 선형매개변수 추정

비선형 요소를 제외한 등가 선형매개변수를 추정하기 위해 비선형 요소를 무시할만큼의 큰 제어입력 전압을 가한다. 비선형적인 힘의 10배이상 큰 제어입력전압을 인가하면 비선형 요소는 무시할만큼 작아지고 선형적인 운동을 하게된다. 본 논문에서는 5V의 계단입력전압을 인가하여 그 응답으로부터 선형 매개변수를 추정한다. 5V의 계단입력전압을 가했을 때, 모터는 고속으로 운동하므로 b_{12} 와 k_{eq} 는 영향을 미치지 못한다. 그림 1(a)의 등가모형에서 마찰력과 코깅토크, b_{12} 와 k_{eq} 를 무시한 2계 시스템모델의 운동방정식은

$$(M_1 + M_2)\ddot{x}_1 = u - b_2\dot{x}_1 \quad (3)$$

이고 (3)식을 라플라스 변환하여 출력변위 x_1 를 미분한 속도와 제어입력의 전달함수를 구하면

$$\frac{V(s)}{U(s)} = \frac{1}{(M_1 + M_2)s + b_2} \quad (4)$$

이다. 이산시간으로 변환하면

$$\frac{V(z)}{U(z)} = \frac{a}{z+b} = \frac{1 - e^{-T_s \frac{b}{M_1 + M_2}}}{z - e^{-T_s \frac{b}{M_1 + M_2}}} \quad (5)$$

이며, T_s 는 표본화 시간이다. a, b 를 recursive least-squares estimation (information form)으로 추정한다. 식(5)로부터

$$\hat{\theta}^T = [a \ b] \quad (6)$$

$$h(k+1) = [-V(k) \ U(k)]^T \quad (7)$$

$$z(k+1) = V(k+1) \quad (8)$$

이고, 추정 알고리즘은

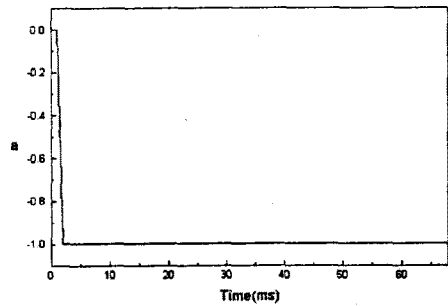
$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + K(k+1)e(k+1) \quad (9)$$

$$e(k+1) = z(k+1) - h^T(k+1)\hat{\theta}(k) \quad (10)$$

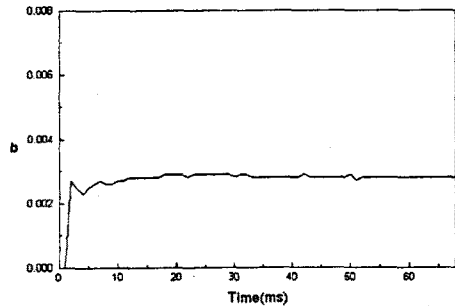
$$K(k+1) = P(k+1)h(k+1) \quad (11)$$

$$P^{-1}(k+1) = P^{-1}(k) + h(k)h(k)^T \quad (12)$$

이다. 제어입력에 비해 비선형적인 힘이 무시될만큼 작으므로 추정된 변수는 발산하지 않는다. 추정 변수의 초기치는 0으로 하였고, 상태오차 공분산행렬 P 의 초기치는 $0.02 I_{3 \times 3}$ 으로 하였다. 추정실험 결과 a, b 는 각각 $-0.993, 0.0029$ 로 수렴한다.



(a) a 추정



(b) b 추정

그림 2. 2계 시스템 모델의 변수추정

식(5)으로부터 $M_1 + M_2, b_2$ 를 얻는다. $M_1 + M_2$ 는 $0.3447Vs^2/m$, b_2 는 $0.2414Vs/m$ 이다.

출발, 정지시에는 비선형 요소가 크게 작용하므로 b_{12} 와 k_{eq} 를 추정알고리즘으로 구하기 어렵다. 따라서 펄스응답으로부터 추정한다. 최대 제어입력에 가까운 큰 입력을 2ms동안 가하면 M_2 의 운동이 멈추는 순간부터 M_1 의 진동이 발생하고 2계 시스템의 부족감쇠특성이 나타난다. 평균값을 제외하면 비선형 요소를 제외한 M_1 의 진동만을 얻을 수 있

다. 본 논문에서는 9V의 펄스입력을 가한 시간응답으로부터 b_{12} 와 k_{a1} 를 추정한다.

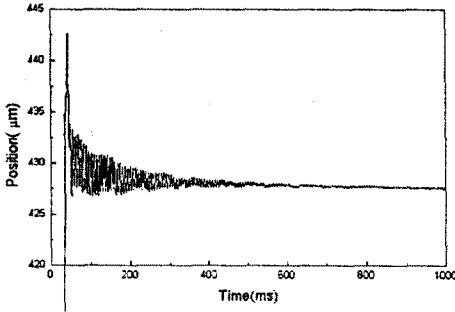


그림 3. 9V 펄스응답

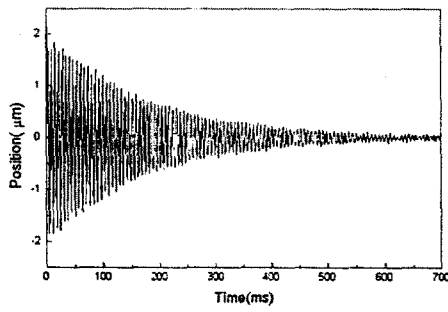


그림 4. 비선형요소를 제거한 M_1 의 진동감쇄특성

b_{12} 와 k_{a1} 를 추정하기 위해서는 M_1 을 추정해야 한다. M_1, M_2 의 질량은 모터의 제원으로부터 얻었고, 각각의 질량은 3.177kg, 0.18kg이다. 비례적으로 M_1, M_2 를 구할 수 있고, M_1, M_2 의 값은 $0.326Vs^2/m$, $0.018Vs^2/m$ 이다. 펄스응답의 진동주기로 T_p 로부터 고유주파수 ω_n 와 k_{a1} 를 얻는다.

$$k_{a1} = \omega_n^2 M_1 = \left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^2 M_1 \quad (13)$$

선형점성마찰력만 존재하므로 1주기 대수 감쇄율, δ_T 로부터 b_{12} 를 얻는다.

$$\delta_T = \ln \frac{X_0}{X_1} = \frac{\pi b_{12}}{\omega_n M_1} \quad (14)$$

X_0, X_1 는 첫 번째와 1주기 후의 피크값이다. 펄스 응답실험을 통하여 얻은 진동주기 T_p 는 7ms, 고유주파수 ω_n 는 $8.98 \times 10^2 \text{rad/s}$, 등가용수철상수 k_{a1} 는 $2.63 \times 10^5 \text{V/m}$, 선형점성마찰계수 b_{12} 는 3.66Vs/m 이다.

4. 비선형힘 추정

리니어모터 위치결정구에는 마찰력과 코깅등이 존재한다. 저속으로 운동할때는 코깅과 마찰력이

나타나고, 고속에서는 마찰력만 나타나고 코깅은 거의 나타나지 않는다.

4.1 마찰력 추정

선형점성마찰력을 제외한 정지 및 쿨롱마찰력은 정밀위치제어에서는 반드시 고려되어야 할 대상이다. 비선형 마찰력은 속도의 함수로 모델링하는 것이 일반적이며, v 에 대한 지수함수,

$$f = (f_s - f_c) e^{-\frac{|v|}{v_c}} + f_c \quad (15)$$

로 나타낸다. f_s 는 정지 마찰력, f_c 는 쿨롱마찰력, v_c 는 속도상수이다. 모터에 여러 가지 크기의 계단 입력전압을 가하여 정지마찰력을 얻을 수 있다. 위치결정기구의 모터 드라이버가 10ms동안 큰 기동력을 발생하므로 10ms이후에 모터가 움직이기 시작하는 순간의 전압으로부터 정지마찰력의 크기를 구할 수 있다. 코깅이 거의없는 위치에서 실험하면 코깅토크의 영향없이 정지마찰력을 추정할 수 있다.

쿨롱마찰력은 정상상태 계단응답으로부터 얻는다.

$$ff = u - (M_1 + M_2)\ddot{x}_2 - b_2\dot{x}_2 \quad (16)$$

이로부터 운동을 방해하는 힘 ff 를 구할 수 있다. 속도가 작을때에는 코깅토크와 비선형마찰력이 같이 작용하지만 속도가 클때에는 쿨롱마찰력만 작용하므로 속도가 클 때 ff 는 쿨롱마찰력이다. 0.8V의 계단응답으로부터 쿨롱마찰력을 추정하였다. 쿨롱마찰력만 나타나는 경계속도는 약 0.2m/s이며, 이로부터 v_c 를 추정할 수 있다. 추정한 f_s, f_c, v_c 는 0.45V, 0.418V, 0.10426m/s이다.

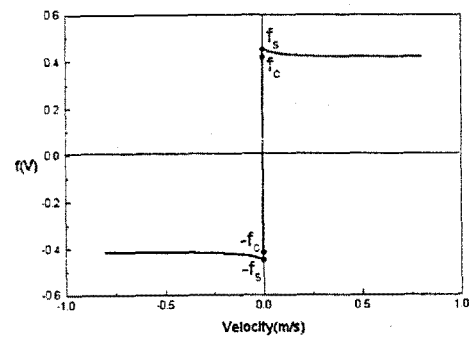


그림 5. 추정 비선형 마찰력

4.2 코깅추정

리니어 브러시리스직류모터는 고정된 영구자석들 위로 운동부가 움직인다. 영구자석사이에 자속분포는 그림과 같다.

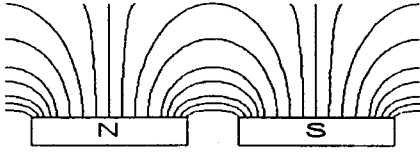


그림 6. 영구자석간에 자속분포

영구자석간에 거리는 22.86mm이고, 자석과 자석은 3.2mm 떨어져 있다. 가까운쪽 영구자석의 중심쪽으로 운동부가 끌려간다. 힘은 영구자석의 중심방향으로 작용하고, 크기는 중심에서 멀어질수록 크다. 영구자석사이의 중점부근에서는 불안정하고, 영구자석의 중심부근에서는 안정하다. 코깅토크는 운동부의 위치에 따라 달라지는 위치함수이며, 영구자석의 중심부근에서는 나타나지않고 중심에서 멀어질수록 커진다. 영구자석의 중심에서 멀어지는 방향으로 운동할때는 구동력을 감소시키고, 가까워지는 방향으로 운동할때는 구동력을 증가시킨다. 운동부를 영구자석의 중심에 위치시키고 모터가 운동을 시작한뒤 코깅토크의 영향으로 정지하게되는 여러 가지 계단입력전압을 가하여 영구자석의 중심에서 영구자석사이의 중점까지의 11.43mm 구간의 코깅토크를 구할 수 있다. 모터가 운동할때는 운동부와 볼베어링사이의 진동이 나타나지 않으므로 운동방정식은

$$u = (M_1 + M_2)\ddot{x}_2 + b_2\dot{x}_2 + f + f_{cog} \quad (17)$$

이다. 모터가 정지하면 \ddot{x}_2, \dot{x}_2 가 0이므로 u 는 $f + f_{cog}$ 와 같다. 이때 f 는 속도가 0이므로 정지마찰력 f_s 이다.

$$f_{cog} = u - f_s \quad (18)$$

으로부터 정지하고 있는 위치에서의 코깅토크를 추정할 수 있다. 추정한 코깅토크를 ln 함수로 근사하면

$$f_{cog} = 0.0455 \ln x + 0.1 \quad (19)$$

과같다.

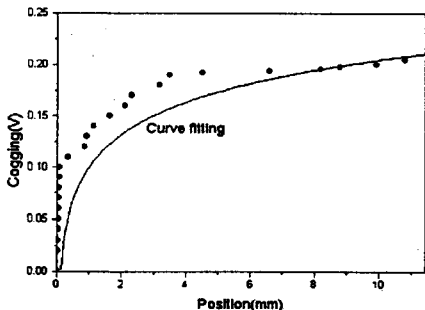


그림 7. 코깅추정

5. 시뮬레이션 및 실험결과

3과4 에서 추정한 매개변수의 신뢰성을 확인하기 위해 추정한 매개변수를 사용하여 비선형 요소가 무시되는 4V 계단응답을 컴퓨터 시뮬레이션으로 구하고, 실험으로부터 얻은 4V 계단응답과 비교한다. 시뮬레이션에 필요한 전달함수는 식 (1)과(2)를 코깅토크와 마찰력을 무시하고 라플라스변환하여 구한다. 실험과 시뮬레이션 결과가 거의 일치하므로 추정한 매개변수가 정확함을 알 수 있다.

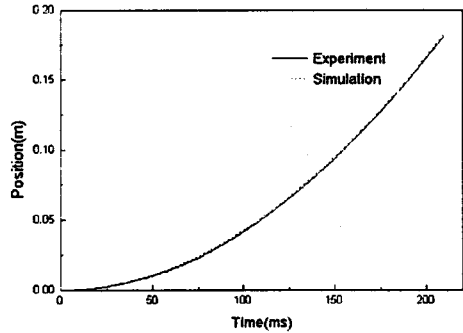


그림 8. 4V 계단응답

무시한 비선형요소때문에 30 μ m정도의 오차가 발생한다. 제어입력이 비선형 요소 비해서 클수록 정확하게 매개변수를 추정할 수 있다.

추정한 정지마찰력보다 크고 마찰력과 코깅의 합보다는 작은 계단입력전압을 가한응답과 선형매개변수를 사용하여 선형모델에 대한 시뮬레이션으로 얻은 계단응답을 비교하면 그림 9와 같다. 모터가 운동을 시작한 후에 코깅의 영향으로 모터가 정지하는 것을 볼 수 있다. 이 상대에서는 마찰력과 코깅의 합과 구동력이 힘의 평형을 이루고 있다. 마찰력과 코깅을 보상하면 시뮬레이션 결과에 근접할 수 있으나 식 (15)와(19)로 부터 마찰력과 코깅을 실시간에 계산할 수 없으므로, 각각을 직선으로 근사하여 보상하였다. 마찰력과 코깅을 보상한 0.5V 계단응답과 시뮬레이션 결과를 비교하면 그림 10과 같다. 직선으로 근사하여 보상했기 때문에 500 μ m정도의 오차가 생긴다.

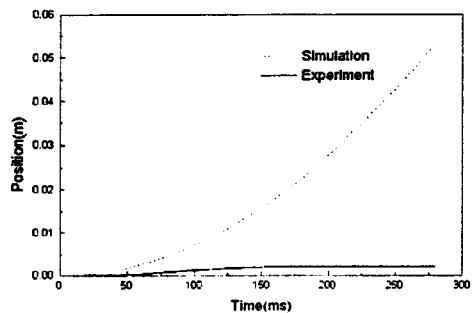


그림 9. 0.5V 계단응답

- [6] 양상식, 최재일, 조용대, "정밀위치제어를 위한 리니어모터 시스템의 모형화," 제3회 G7 첨단 생산시스템 workshop, pp.783-792, 1995

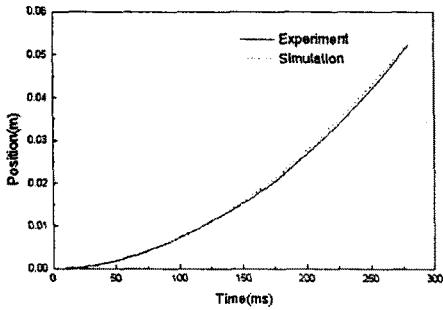


그림 10. 마찰력과 코깅을 보상한 0.5V 계단응답

6. 결 론

본 논문에서는 정밀위치 제어를 위하여 비선형 요소를 고려한 2자유도계 모델을 세우고 선형매개변수를 실험과 recursive least-squares estimation 알고리즘으로 추정하였다. 추정한 선형매개변수를 이용하여 실험으로 마찰력과 코깅을 추정하였다. 추정한 선형매개변수값을 사용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 모델의 타당성과 매개변수의 신뢰성을 확인하였고, 마찰력과 코깅을 보상했을 때 선형매개변수를 사용한 시뮬레이션결과와 거의 일치함을 확인하였다. 마찰력과 코깅을 고려하고, 매개변수를 추정한 본 논문의 모형과 변수추정알고리즘은 정밀위치제어기 설계에 유용하게 적용될 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. Armstrong, *Control of Machines with Friction*, Kluwer Academic Press, pp. 7-21, 1991
- [2] Canudas de Wits, C., 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.
- [3] Ackermann B, Janssen JHH, Sottek R and van Streen RI, "New technique for reducing cogging torque in a class of brushless DC motors," IEE Proceedings 139, No.4, pp.315-320, 1992.
- [4] Boules N, "Prediction of no-load flux density distribution in permanent magnet machines," IEEE Transactions, Vol. IA-21, No. 4, pp. 633-643, 1985
- [5] 양상식, "리니어 브러시리스 직류 모터의 모델링," 제2회 G7 첨단생산시스템 workshop, pp. 454-457, 1994.