

철심형 리니어모터의 추력 리플 억제에 관한 연구

송창규*, 김정식+, 김경호**, 박천홍***

Studdy for Force Ripple Suppression of the Iron Core Linear Motors

Chang Kyu Song*, Jeong Sik Kim+, Kyung Ho Kim**, Chun Hong Park***

Abstract

Higher productivity requires high-speed motion of machine tool axes. The iron core linear DC motor (LDM) is widely accepted as a viable candidate for high-speed machine tool feed unit. LDM, however, has two inherent disturbance force components, namely cogging and thrust force ripple. These disturbance forces directly affect the tracking accuracy of the feeding system and must be eliminated or reduced. In order to reduce motor ripple, this research adapted the feedforward compensation method and neural network control. Experiments carried out with the linear motor test setup show that these control methods are effective in reducing motor ripple.

Key Words : Linear DC motor (LDM), Tracking control, Feedforward compensation, Neural network, Cogging force

1. 서론

현대 생산기술의 특징은 고생산성의 추구하고 대상 가공품 형상의 복잡성에 있다고 할 수 있다. CAD로 설계된 복잡한 형상을 가공하며 고생산성을 달성하기 위해서는 생산 기계인 공작기계 각 축이 고속화되면서 동시에 높은 정도의 운동 정밀도를 갖는 것이 필연적이다.

고속 가공기의 이송계를 구성하는 기존의 방법은 회전모터와 볼스크류로 이루어지는 간접적 드라이브 방식이지만 속도와 가속도 및 정밀도에서 제한적이다. 반면 최근의 각종 국제 공작기계전시회에서 선보이고 있는 리니어모터에 사용한 직접구동 방식의 공작기계 축은 간접적 드라이브 방식에 비해 다음과 같은 장점을 갖고 있기 때문에 그 수요가 점증하고 있다.

- 백래쉬가 없고 마찰이 작다.
- 가속도와 속도에 기계적 제한이 없다 : 속도는 엔코더의 밴드폭이나 전원 회로에 의해서만 제한된다.
- 기계적으로 간단하고 그로 인해 높은 신뢰성과 높은 프레임 강성을 보인다.

공작기계 이송계로 가장 많이 사용되는 리니어모터는 리니어 DC 모터(linear dc motor, LDM)로서 그 중에도 철심에 코일을 감은 철심형이 무철심형에 비해 추력이 크기 때문에 공작기계에서의 채택 비율이 매우 높다. 하지만 철심형은 추력이 큰 대신에 이송계에 대해 외란이라 할 수 있는 모터 리플(motor ripple)이 발생하여 정밀도가 떨어지는 단점이 있다.

모터 리플에는 코깅(cogging or detent force)과 추력 리플(force ripple or reluctance force)의 2가지가 있다.

* 발표자, 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 (song@kimm.re.kr)

주소: 305-343 대전시 유성구 장동 171

+ 충남대 대학원 기계공학과

++ 한국과학기술원 기계공학과

+++ 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

코깅은 자기적인 외란이라 할 수 있고 추력 리플은 전자기적 영향에 의한 외란이라고 할 수 있다. 코깅은 배열된 영구자석에 대해 자성체인 철심의 위치가 자기적으로 안정된 상태를 찾아가려는 경향에 의해 나타난다. 이것은 모터 코일의 자석에 대한 상대적인 위치에만 관계가 있고 모터 전류와는 독립적이다. 추력리플은 코일에 전류를 흘렸을 때 코일에 발생하는 자기장이 영구자석과 결합하여 나타내는 힘으로서 무철심형에도 존재하는 힘이다. 추력 리플은 모터 전류가 0이 아닌 때에만 발생하고 이것의 절대값은 요구되는 힘과 이송자의 상대적 위치에만 의존한다. 이러한 모터 리플은 이송자의 속도 변동을 일으켜서 추종성을 떨어뜨리므로 추적 오차를 발생시킨다¹⁴⁾.

본 논문은 리니어 DC 모터(LDM)로 구성된 이송계에서 모터 리플에 의해 발생하는 추적오차를 피드포워드 제어와 신경망 제어에 의해 감소시켜 이송계의 추종성을 향상시키는 방법에 대해 논한다. 먼저 LDM이 갖는 외란적 성격의 모터 리플의 특성을 파악하고 그 특성을 피드포워드 필터로 활용하여 피드포워드 제어를 실행한 결과를 제시하고 다음으로 신경망제어에 의하면 모터 리플의 측정 없이도 개선된 결과를 얻을 수 있음을 보인다. 피드포워드제어와 신경망제어 방식의 유용성을 검증하기 위하여 실험장치를 제작하고 실험 결과를 제시한다.

2. 제어계의 구성 및 이송계의 제작

2.1 제어계의 구성

본 연구에서 사용되는 제어계는 Fig. 1의 블록선도와 같이 일반적인 PID 제어기와 피드포워드 제어기 및 모터 리플을 억제하기 위한 추가적인 제어기의 3가지 제어기로 구성된다. PID 제어기와 피드포워드 제어기는 이송계의 주된 동특성을 관장하여 안정성 및 강건성을 확보하게 한다. 추력 리플을 억제하기 위한 추가적인 제어기는 코깅 피드포워드 제어기와 신경망 제어기를 의미한다. LDM 이송계의 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u(t) = k_e \dot{y}(t) + R i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

$$i(t) = \frac{1}{K_f} f(t) \quad (2)$$

$$f(t) = m \ddot{y}(t) + f_{load}(t) + f_{fric}(t) + f_{ripple}(\dot{y}, y) + f_n(t) \quad (3)$$

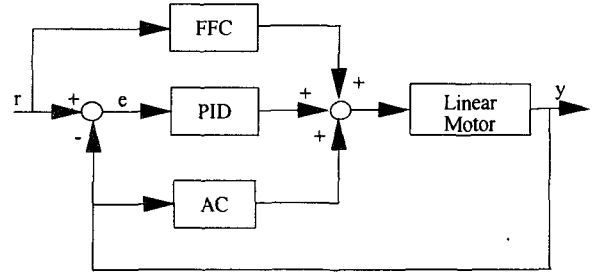


Fig. 1 Block diagram of the proposed control scheme

여기서 $u(t)$ 와 $i(t)$ 는 모터 입력전압과 전류이며 $y(t)$ 는 모터의 위치이다. $f(t)$ 와 $f_{load}(t)$ 는 각각 모터 추력과 외부력이고 $f_{fric}(t)$ 와 $f_{ripple}(t)$ 는 각각 마찰력과 모터 리플에 의한 힘을 표시한다. 비선형 성분과 미확정 성분을 무시한다면 식 (1)-(3)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$u(t) = k_e \dot{y} + \frac{Rm}{k_f} \ddot{y} + \frac{Lm}{k_f} \ddot{\dot{y}} \quad (4)$$

전체 이송계의 피드포워드 제어기는 이송계 모델의 역수이므로 (4)식에 의해 FFC는 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$u_{FFC} = k_e \dot{r} + \frac{Rm}{k_f} \ddot{r} + \frac{Lm}{k_f} \ddot{\dot{r}} \quad (5)$$

2.2 리니어 모터 이송계의 제작

추종성 향상을 위한 실험을 위해 Fig. 2와 같은 리니어 DC 모터로 이송계를 설계, 제작하였다. 전체적인 구성은 삼익LMS社가 증기거점사업으로 개발한 철심형 리니어모터 시제품 2호기와 THK社의 LM 가이드(HSR55R) 및 THK社의 모터 앰프로 구성하였고 리니어스케일은 분해능 $1 \mu m$ 인 Renishaw社의 RGH-22를 채택하였다. 실험대상인 리니어모터는 공작기계 이송계에 많이 사용되는 철심형 리니어 모터로 철심에 삼상의 권선이 감겨있고, 최대추력은 8,000 N, 연속추력은 4,000 N이다. 모터 이송자의 무게는 $m = 109.7 kg$ 이고 선간저항 $R = 0.7 \Omega$, $L = 3 mH$ 이다. 모터 상수 $k_f = 116.7 N/A$ 이고 $k_e = 10 V/s/m$ 이다.

제어기는 TI社의 TMS320C44 DSP 칩이 내장된 Innovative Integration社의 M44 보드를 사용하였으며 MOT 모션제어 유니버스 카드를 부착하여 사용하였다.

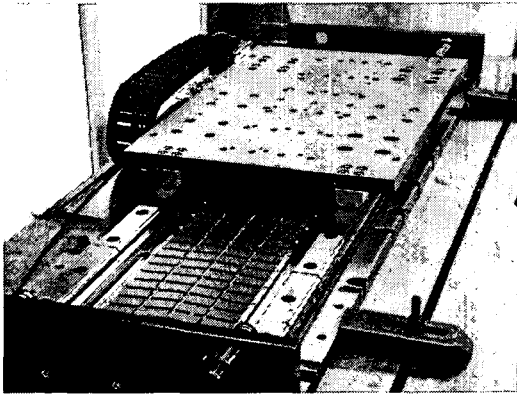


Fig. 2 Experimental setup for linear DC motor feeding system

2.3 PID와 피드포워드에 의한 제어 실험

제안된 PID와 피드포워드 제어기의 안정성과 강건성을 확인하기 위하여 모터 리플에 대한 고려 없이 PID와 피드포워드 제어만으로 모터를 이송하는 실험을 수행하였다. 이송궤적은 속도와 가속도의 변화를 주기 위하여 다음과 같은 궤적을 선택하였다.

$$r(\tau) = 10^6 [y_o + (y_o - y_f)(15\tau^4 - 6\tau^5 - 10\tau^3)] \quad (6)$$

여기서, x_o 와 x_f 는 각각 모터의 시작과 끝 위치이고 $\tau = t/(t_f - t_o)$ 에서 t_o 와 t_f 는 각각 시작시간과 종료시간이다. 본 실험에서는 $y_o = 0$, $y_f = 0.2$, $t_o = 0$, $t_f = 3$ 으로 하였다. Fig. 3에 이송 궤적을 그렸다.

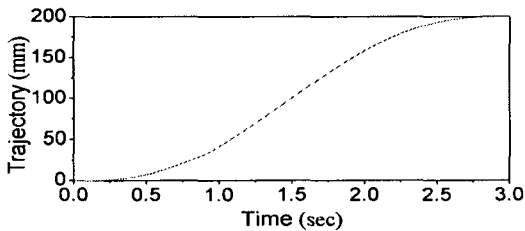


Fig. 3 Trajectory of the LDM

PID 제어만으로 이송시켰을 경우와 PID 및 피드포워드 제어를 함께 수행하였을 경우의 이송 오차를 Fig. 4에 비교하였다.

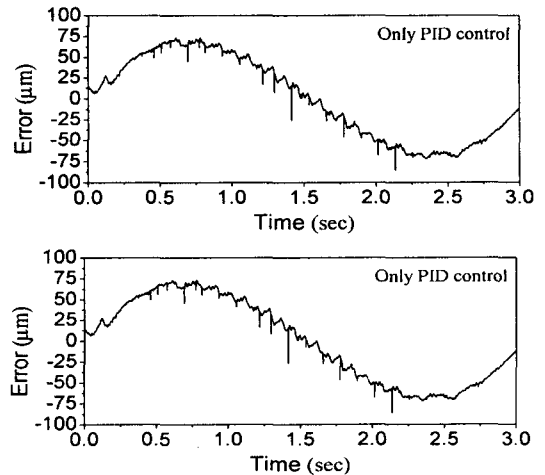


Fig. 4 Tracking performance by PID control and by PID+feedforward control

Fig. 4에서 보면 PID 제어만으로는 $\pm 75\mu\text{m}$ 의 추적 오차를 보였지만 PID와 피드포워드를 동시에 적용한 결과 $\pm 10\mu\text{m}$ 로 오차를 줄일 수 있었다. 이송계의 관성 등에 의한 오차는 현격하게 줄어들었으나 코깅과 추력리플에 의한 오차가 계속 남아 있음을 알 수 있다.

3. 코깅 측정에 의한 피드포워드 제어

3.1 코깅 측정

리니어 모터의 코깅을 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 로드셀과 레이저 간섭계를 이용하였다. 로드셀에 덧붙여 장착되어 있는 스크류를 이용하여 레이저 간섭계로 위치를 1 mm씩 확인하면서 변화시키고 이때 로드셀에 가해진 힘을 측정하였다.

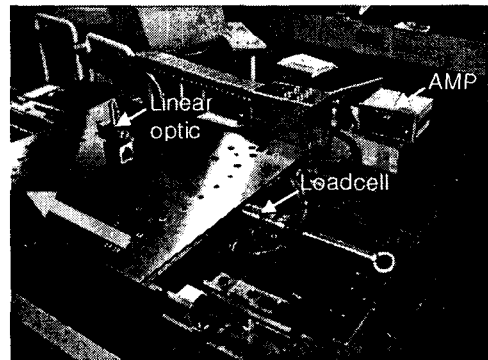


Fig. 5 Experimental setup for cogging measurement in linear motor feeding system

측정된 코깅값과 이를 사인 함수로 곡선맞춤(fitting)한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 한편, 자석은 모두 동일한 것으로 가정하여 이송의 전구간이 아닌 자석의 한 피치 구간에서만 측정하였다. Fig. 6에서 보면 코깅의 주기는 10 mm로 나타났으며, 이는 설치된 자석간의 피치인 30 mm(Fig. 7)의 1/3로써 각 상(phase)이 한 번 바뀔 때마다 코깅이 발생하는 것으로 보인다. 위치에 따른 코깅값을 사인 함수로 나타내면 식 (7)로 표현할 수 있다.

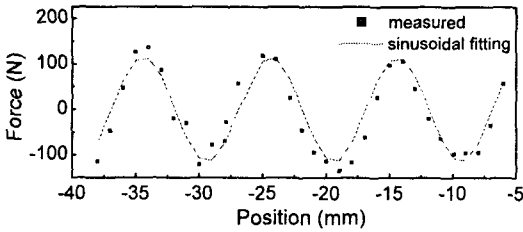


Fig. 6 Cogging force measured from setup in Fig.2

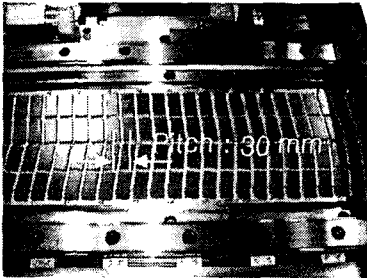


Fig. 7 Photograph of magnet placement

$$F = 116.6 \sin\left\{\pi \frac{x - 3.17891}{4.99615}\right\} N \quad (7)$$

3.2 피드포워드 제어 실험

Fig. 8은 피드포워드 제어 없이 PID제어만 한 경우와 코깅을 이용하여 피드포워드 제어를 한 경우를 비교한 결과이다. PID 제어만으로는 150 μ m 정도의 추종오차를 발생하였으나 코깅 제어를 통해 75 μ m 정도로 추종오차를 줄어들어 50% 정도의 향상이 있었음을 확인할 수 있다.

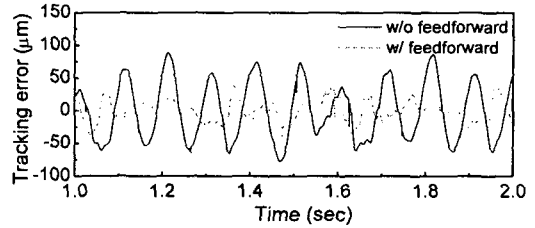


Fig. 8 Comparison of between feedforward and non-feedforward control

4. 신경망 PID 제어에 의한 향상

4.1 신경망 알고리즘

신경망 알고리즘은 학습을 통해 출력이 입력을 추종하도록 하는 것이며, 뛰어난 학습능력으로 인해 비선형 시스템의 제어에 매우 효과적이라고 알려져 있다. 학습은 목적함수를 설정하여 이 목적함수가 최소가 되도록 입력과 출력 사이의 가중치 값을 변화시키는 것에 의해 이루어진다.

본 논문에서는 Fig. 9와 같은 신경망에서 입력을 원하는 위치(r), 출력을 신경망의 출력 전압값(u_{neural})으로 설정하고 은닉층으로는 세 개의 뉴론을 두었다.

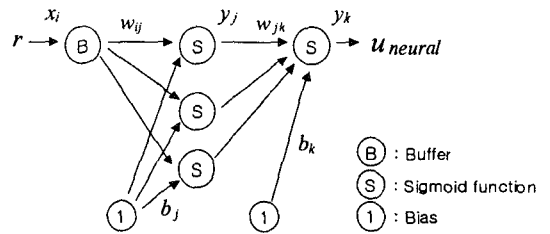


Fig. 9 Neural network

4.2 실험결과

Fig. 10은 각 위치마다 각각의 가중치를 부여했을 경우로 학습이 진행됨에 따라 추종오차가 매우 작아지는 것을 알 수 있다. 15번 학습결과 학습 전보다 10배 이상 좋아져 60 μ m 정도의 추종오차를 보이고 있다.

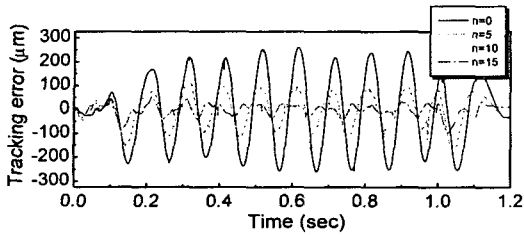


Fig. 10 Learning result in case of applying individual weight factor

5. 결론

철심형 리니어모터에 고유하게 내재하는 모터리플은 추종성 오차를 불러온다. 추종성 오차를 줄이기 위하여 코강 측정에 의한 피드포워드 제어와 신경망 제어를 적용하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 이송계의 수학적 모델링에 근거한 피드포워드 제어를 추가함으로써 PID 제어만 수행하였을 경우보다 추적 오차를 80% 이상 감소시킬 수 있었다.
- (2) 모터 리플을 억제하기 위한 코강피드포워드 제어로 추적 오차를 50% 감소시킬 수 있었다.
- (3) 신경망 제어에 의하면 코강의 측정이 불필요하며 피드포워드보다 향상된 결과를 15번 학습에 의해 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Van Den Braembussche, L.C.P., Swevers, J., Van Brussel, H. and Vanherck P., "Accurate Tracking Control of Linear Synchronous Motor Machine Tool Axes," *Mechatronics*, Vol. 6, No. 5, pp. 507-521, 1996.
- (2) Gerco, Otten, Theo, J.A. de Vries, Job, van Amerongen, Adrian M. Rankers and Erik Gaal, "Linear Motor Motion Control Using a Learning Feedforward Controller," *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, Vol. 3, No. 3, pp. 179-187, 1997.
- (3) Pritschow, G. and Philipp, W., "Research on the Efficiency of Feedforward Controllers in Direct Drives," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, pp. 411-415, 1992.
- (4) Tan, K.K., Huang, S.N., Dou, H.F., Lee, T.H., Chin, S.J. and Lim, S.Y., "Adaptive Robust Motion Control for Precise Trajectory Tracking Applications," *ISA Transactions*, Vol. 40, pp. 57-71, 2001.
- (5) Zhong, L., Rahman, M.F. and Lim, K.W., "Modelling and Experimental Studies of An Instantaneous Torque and Field Weakening Control Scheme for An Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive," *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 46, pp. 289-300, 1998.
- (6) Van den Braembussche, P., Swevers, J. and Van Brussel, H., "Design and Experimental Validation of Robust Controllers for Machine Tool Drives with Linear Motor," *Mechatronics*, Vol. 11 pp. 545-562, 2001.