

AE 및 가속도 신호를 이용한 리니어 모터 이송시스템의 특성분석  
유 송 민\*

Characterization of Linear Motor Feed System with AE and Acceleration  
Signal  
Song Min Yoo\*

\* 경희대학교 기계·산업시스템 공학부

College of Mechanical and Industrial System Engineering, Kyung Hee University

**Abstract**

A brushless linear motor is suitable for operation with higher speed and precision. Since it does not involve mechanical coupling, linear driving force can be applied directly. Conventional PID and fuzzy controllers are implemented and performance results using those controllers are compared. Along with better simulated performance observed using fuzzy controller, further fabrication is to be included with various empirical results. Several system operational characteristics have been observed. Typical nonlinearities as friction, cogging and torque or thrust ripple that might deteriorate system performance would be tackled using presumably effective method such as neural network based learning controller.

**Key Word** : Linear motor (리니어모터), Feed system (이송계), Modeling (모델링), PID controller (PID 제어기), Magnetomotive force (기자력)

1. 서론

가공시스템의 성능이 고정도, 고속화, 고효율화되는 추세에 따른 가공시스템의 요구성능을 충족시키기 위하여 제안되고 있는 것 중에 하나가 고속지능형 머시닝센터이며 이를 위하여

기존에 공작기계에 적용된 것보다 우수한 기술이 요구되고 있다. 고속가공을 위하여 이송계로는 기계적인 장애요소를 극복할 수 있는 리니어모터를 사용하는 추세이다. 리니어 모터는 일반적인 회전형태의 모터를 길이방향으로 펼쳐놓은 구조를 나타내며 자기부상열차와 유사한 형식을 나타낸다. 이러한 리니어 모터를 이용한 이송계는 공작기계에서의 각종 장작물이 장착된 운동부의 이송을 담당하게 된다. 리니어모터를 구동함에 있어서 볼스크류(ball screw)와는 달리 기계적인 요소가 배제되므로 여러가지의 특성측면에서 차이가 크다. 대표적인 특징으로 동력전달계에서 나타나는 휨현상이나 백래쉬가 없어져 강성이 크게 향상되며 결과적으로 고속가공시에 정밀도의 향상을 기대할 수 있게 된다. 특히 분당 30 m/min이상의 고정도 가공이 가능해야 되는 고속가공기기의 경우에는 볼스크류를 사용하는 이송계의 경우 백래쉬, 발열, 탄성변형 및 낮은 강성으로 인하여 제어성이 저하되므로 리니어모터를 사용한 직접적인 슬라이드 구동을 사용하게 된다.

이송계의 제어기법으로서 재래식 이송계형태인 회전운동형 서보모터시스템에는 재래식 PID 제어, 비선형제어 및 feedforward 제어기법 등 다양한 방법에 대한 특징이 비교되었다[1]. 리니어모터 제어계를 구성하기 위한 시스템모델링으로서 기자력(magnetomotive force)과 역기전력(back electromotive force)을 이용한 모델이 제기되어 재래식 제어기법에 따른 각종 성능평가 시도되었으며[2] Lagrange법을 이용한 모델이 개발되어 공작기계의 이송구동계에 적용

되었다[3]. 리니어모터를 제어하기 위하여 재래식 PID기법도 시도되어 각각의 이득을 조정하기 위한 성능평가가 검토되기도 하였으며 외란(force disturbance)을 보상하는 feedforward 제어기법도 시도되었다[4]. 밀링가공에 MIMO  $H_\infty$  제어를 사용하여 엔드밀가공 중에 절삭력에 의한 추종오차를 감소시켰다[5]. 모델링이 어려운 비선형요소를 신경망을 이용한 학습법을 이용하여 제어기에 적용시킨 결과 추종오차를 상당히 감소시켰다[6]. 이러한 리니어모터의 비선형적 요소로 마찰, cogging 및 추력리플(thrust ripple) 또는 토크리플(torque ripple)현상 등의 장애요소가 있으며 이로 인한 성능저하를 개선하기 위한 노력이 다양하게 시도되었다[7]. 본 연구에서는 개발 중인 리니어모터를 활용한 이송계에서 제반 신호의 특성을 파악하여 설계 및 제어에 활용시킬 수 있는 기반을 구축하고자 한다.

## 2. 시스템 모델링

일반적인 시스템의 모델링은 영구자석형 DC 리니어모터의 경우 기자력,  $F(t)$ 와 자기저항,  $R$ 의 식으로 표현된다[2]. 즉

$$F(t) = \Phi(t) R$$

이때 전기자의 전자기적 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$E_a = K_e v + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

단,  $L_a$ : 전기자 자기인덕턴스

$R_a$ : 전기자 코일저항

$K_e$ : 역기전력상수

$i_a$ : 전기자 전류

$E_a$ : 역기전력

$v$ : 속도

이때의 동력학적 관계식은 다음과 같다.

$$(M_L + M_C) \frac{dv}{dt} = K_f i_a$$

단,  $K_f$ : 추력상수

$M_L, M_C$ : 부하, 코일중량

최종적인 전기자전압과 속도간에 관계 및 전달함수는 다음과 같다.

$$T_e T_m \frac{d^2 v}{dt^2} + T_m \frac{dv}{dt} + v = E_a / K_e$$

$$G(s) = V(s) / E_a(s) = 1 / \{K_e (s^2 T_e T_m + s T_m + 1)\}$$

단  $T_e$ 와  $T_m$ 은 다음과 같다.

$$T_e = L_a / R_a$$

$$T_m = (M_L + M_C) R_a / K_e K_f$$

최종적인 전기자전압과 속도간에 관계 및 전달함수는 다음과 같다. 모델링에 사용된 시스템의 동특성을 실험적으로 파악하기 위하여 리니어모터 이송시스템을 구동하여 응답신호를 저장 분석하였다. 입력신호에 대한 응답성을 참조하여 시스템특성의 근사치를 유추하였다. 구동신호를 제어보드를 통하여 증폭기 및 구동기를 거쳐 모터로 공급하였으며 이때 생성되는 위치를 리니어스케일을 통하여 수집하였으며 속도는 위치신호를 기반으로 별도로 처리하여 분석하였다. 실험장치상에서 이송구간이 제한되므로 계단함수 형태보다는 임펄스함수 형태의 구동신호로 생성하여 시스템을 구동하였다. 시스템의 각종 변수 및 실험을 통하여 계산된 전압과 속도간의 관계인 시스템의 동력학적인 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{V(s)}{E_a(s)} = \frac{1}{5.072 \times 10^{-6} s^2 + 0.5047 s + 2.2} \text{ (m/V)}$$

이를 토대로 시스템의 응답특성과 모델링에 따른 속도의 응답특성을 비교할 수 있으며 구동신호에 따르는 시스템의 위치변화를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

이를 토대로 시스템의 응답특성과 모델링에 따른 속도의 응답특성을 비교할 수 있으며 구동신호에 따르는 시스템의 위치변화를 다음과 같이 나타낼 수 있다(Fig. 1).

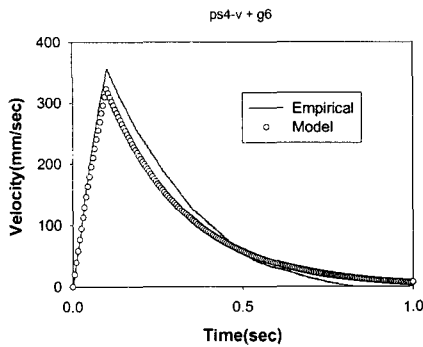


Fig. 1 System and model response comparison

### 3. 이송계의 특성 파악

#### 3.1 응답특성

리니어모터이송계의 제어조건별 응답특성을 분석하기 위하여 안정적인 운전영역내에서 제반 제어조건별 응답성 및 오차를 측정하였다. 위치결정제어를 위한 목표위치를 300mm로 설정하고 속도 및 가속도의 크기에 따라 medium, fast와 fastest로 설정하고 또 다른 제어조건으로 가장 안정적인 제어상수(B)와  $k_p$  감소(C),  $k_i$  증가(D)의 조건을 설정하였다. 위치오차를 기준으로 판단한 결과 속도 및 가속도의 증가에 따른 위치 및 속도의 오차가 관찰되었다. 일반적으로 제어상수의 변화시  $k_p$ 를 감소시키는 경우에 수렴속도가 저하되고 위치오차는 증가하였으나  $k_i$  증가시에는 위치오차의 증가는 현저하게 나타나지 않았으나 진동의 영향이 증가하는 것으로 나타났다(Figs. 2-4).

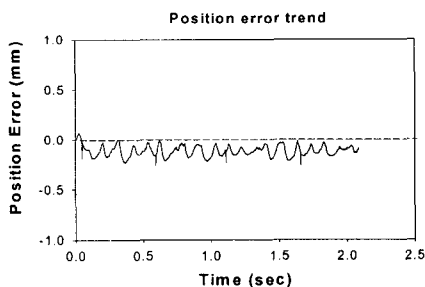


Fig. 2 Position error(Medium)

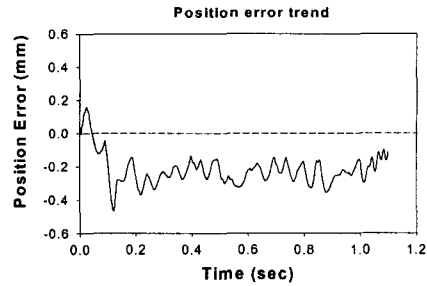


Fig. 3 Position error(Fast)

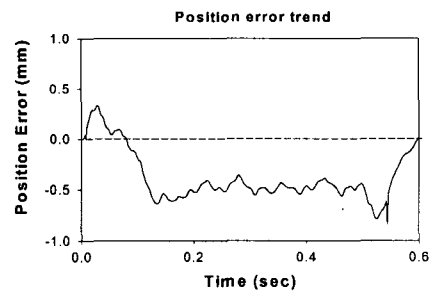


Fig. 4 Position error(Fastest)

#### 3.2 시스템의 운전특성

이송계는 운전중에 과도한 부하 등의 각종 운전조건으로 인하여 다양한 반응을 나타내며 이때 나타난 결과에 따라 응용되는 가공시스템 등의 부속시스템에 커다란 영향을 미치게 된다. 이에 이러한 특성을 파악하기 위하여 운전조건별로 나타나는 시스템의 운전특성을 음향방출(AE;Acoustic Emission) 및 3축 가속도센서를 사용하여 측정 및 분석하였다. 베이스측면(A), 가이드프레임 종단부(B), 덮개(C), 가이드상부(D) 등 4개소에 센서를 설치하여 측정하였다(Fig. 5). 비운전상태에서 분석한 결과, 측정된 AE 및 진동신호의 RMS값이 덮개부분에서 가장 높게 나타났으며 다음으로 AE신호는 가이드상부에서 진동신호는 가이드프레임 종단부에서 높게 나타났다(Figs. 6-8).

각 지점별로 측정된 특성을 분석한 결과 베이스측면부에서 fastest로 갈수록 가속도신호는 증가하였으나 AE신호는 변화가 없었으며 다른 지점에서는 가속도의 신호가 fastest로 갈수록 감소하는 경향이 나타났다(Figs. 9-12).

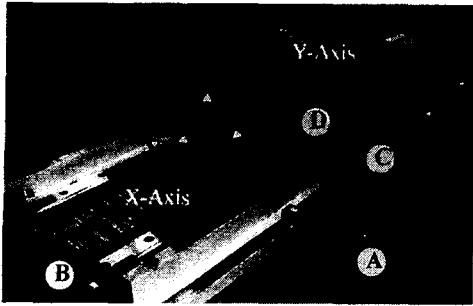


Fig. 5 Sensor layout

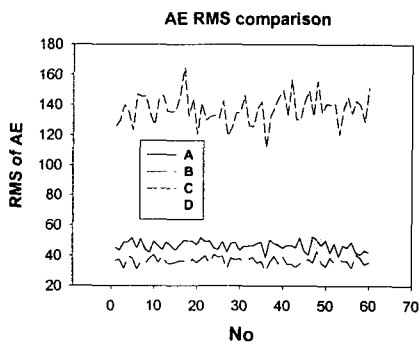


Fig. 6 AE RMS level

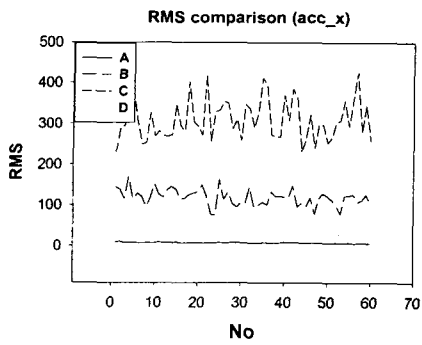


Fig. 7 Acc\_x level

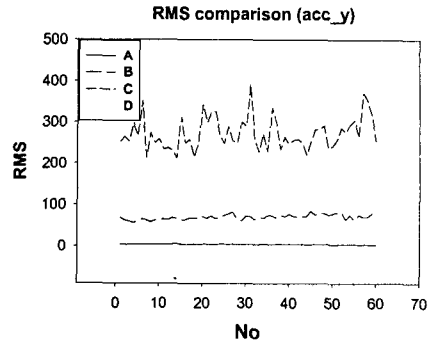


Fig. 8 Acc\_y level

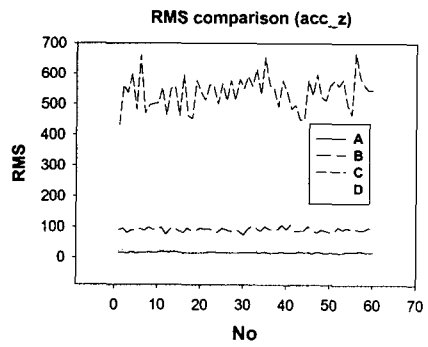


Fig. 9 Acc\_z level

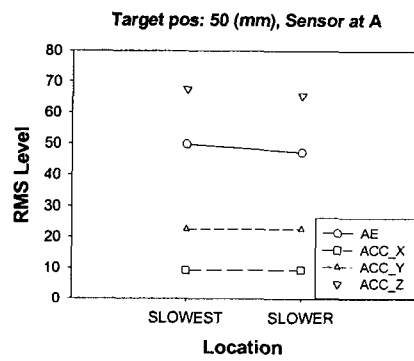


Fig. 10 RMS level at A (target position 50 mm)

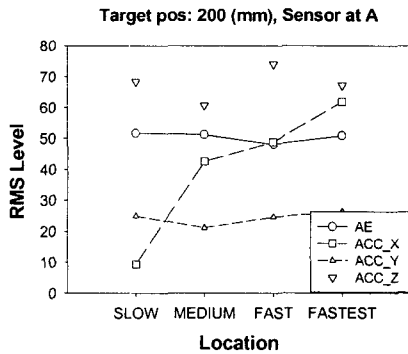


Fig. 11 RMS level at A (target position 200 mm)

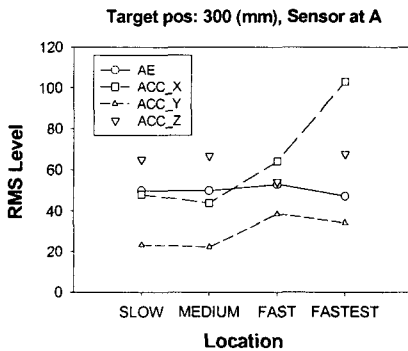


Fig. 12 RMS level at A (target position 300 mm)

#### 4. 결론

리니어모터시스템을 분석하기 위한 모델을 도입하여 제어기들을 구성하였으며 이들의 성능을 비교하였다.

제안된 모델을 기초로 실험을 통하여 시스템의 모델인자를 결정하고자 한다.

일반적인 회전형 모터를 사용한 이송시스템에서 관찰되는 기계적인 장애요소가 적은 리니어모터는 사용되는 영구자석의 자화정도, 형태 및 fringing 효과로 인하여 발생하는 마찰, cogging 및 ripple 현상이 장애를 초래하므로 이를 효과적으로 감소시킬 수 있는 제어기법을 도입한다. 신경망을 사용하는 제어법은 정확한 형태가 정의되지 않은 비선형요소를 학습과정을 통해 파

악한 후 보상하여 오차를 최소화하도록 하는 방법이다.

개발하고자 하는 리니어모터 이송계는 고속가공을 지향하고 있으며 고속영역에서 적용하기 어려운 제어기의 한계를 정의하고 이를 극복할 수 있는 기법을 제안하고자 한다.

제안된 리니어모터이송계의 운전상태는 여러 가지 인자로 파악될 수 있으며 이를 위한 자료를 최소화하기 위하여 신경망기법을 사용한 민감도 분석을 통하여 최적추정인자를 정의하고자 한다

#### 참고 문헌

1. Renton, D., and Elbestawi, M.A., "High Speed Servo Control of Multi-Axis Machine Tools", *Int'l J. of Mach. Tool & Manufact.*, Vol. 40, pp. 539-559, 2000.
2. Ha, K.S., Im, T.B., Chung, J.K., and Yang, J.M., "High Speed Position Control System with Linear Brushless DC Motor", *Proc. of ICEE*, Vol. 2, pp. 259-262, 1999
3. Kumin, L., Stumberger, G., Dolinar, D., and Jezernik, K., "Modeling and Control Design of a Linear Induction Motor", *Proc. of IEEE, ISIE.*, Vol. 2, pp. 963-967, 1999
4. Bassi, E., Benzi, F., Moro, F., and Buja, G., "Force Disturbance Compensation for an A.C. Brushless Linear Motor", *Proc. of IEEE, ISIE.*, Vol. 3, pp. 1350-1354, 1999
5. Choi, C., Tsao, T.C., and Matsubara, A., "Control of Linear Motor Machine Tool Feed Drivers for End Milling: Robust MIMO Approach", *Proc. of ACC*, Vol. 5, pp. 3723-3727, 1999
6. Hu, A.P., Register, A., and Sadegh, N., "Using a Learning Controller to Achieve Accurate Linear Motor Motion Control", *Proc. of the IEEE/ASME Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 611-616, 1999
7. Min, B.W., Choi, J.H., and Lee, J., "Thrust Ripples Reduction in the Moving Magnet Type LDM by using FEM & Phase Control", *Proc. of the SMIC*, pp. 301-304, 1999