

## 리니어모터 응용 고속이송계 제어기술 개발

유승민(경희대학교 기계산업시스템공학부)

### Development of High Speed Feed System using Linear Motor

S. M. Yoo (College of Mechanical and Industrial System Engineering, Kyung Hee University)

#### ABSTRACT

A brushless linear motor is suitable for a high-accuracy servo mechanism. It is also suitable for operation with higher speed and precision. Since it does not involve some sort of mechanical coupling, linear driving force can be applied directly. Basic models including magnetomotive force and electromotive forces are introduced and simplified. Both 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. 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 Words** : Linear motor (리니어모터), Feed system (이송계), Modeling (모델링), PID controller (PID 제어기), Magnetomotive force (기자력)

#### 1. 서론

산업이 고도화됨에 따라 가공시스템의 성능도 고 정도, 고속화, 고효율화되는 추세이다. 이러한 가공 시스템의 요구성능을 충족시키기 위하여 제안되고 있는 것 중에 하나가 고속지능형 머시닝센터이며 이를 위하여 기존에 공작기계에 적용된 것보다 우수한 기술이 요구되고 있다. 고속가공을 위하여 주축과 이송계 모두의 고속화가 이루어져야 하며 이송계는 기계적인 장애요소를 극복할 수 있는 리니어모터를 사용하는 추세이다.

리니어 모터는 일반적인 회전형태의 모터를 길이 방향으로 펼쳐 놓은 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 뒤틀림이나 백래쉬가 없어져 강성이 크게 향

상되며 결과적으로 고속가공시에 정밀도의 향상을 기대할 수 있게 된다. 특히 분당 30 m/min이상의 고 정도 가공이 가능해야 되는 고속가공기계의 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 PID제어, 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 성능평가가 시도되었으며[2] Lagrange법을 이용한 모델이 개발되어 공작기계의 이송구동계에 적용되었다[3].

리니어모터를 제어하기 위하여 재래식 PID기법도 시도되어 각각의 이득을 조정하기 위한 성능평가 검토되기도 하였으며 외란(force disturbance)

을 보상하는 feedforward 제어기법도 시도되었다 [4]. 밀링가공에 MIMO  $H_\infty$  제어기를 사용하여 엔드 밀가공 중에 절삭력에 의한 추종오차를 감소시켰다 [5]. 모델링이 어려운 비선형요소를 신경망을 이용한 학습법을 이용하여 제어기에 적용시킨 결과 추종 오차를 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 리니어모터 및 모터제어기를 토대로 이에 적용시킬 수 최적의 제어 알고리즘을 적용하고 사용자가 이를 활용할 수 있도록 사용조건별 제어환경을 제공하는 것을 목표로 한다.

## 2. 시스템모델링

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.

$$T_e = L_a / R_a$$

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

## 3. 제어기의 구성

### 3.1 PID 제어기

본 연구에서는 시스템의 특성을 파악하고 제어기 간의 성능을 비교 분석하기 위하여 일반적으로 사용되는 재래식 선형 PID의 제어기를 도입하였으며 이를 간략화하여 시스템에 적용시킨 블럭선도는 Fig 1과 같다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

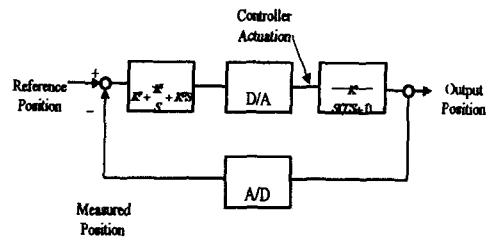


Fig. 1 Block diagram of PID controller

### 3.2 퍼지제어기

또다른 제어기로 퍼지제어기를 시도하였다. 퍼지제어기의 블럭선도는 Fig. 2에 나타나 있으며 제어기의 입력변수로 오차와 오차의 변화율을 사용하였다. 퍼지 추론에 사용한 법칙에 의한 표는 Table 1과 같다. 프로세스의 입력인 제어량은 수치적인 값이어야 하므로 퍼지값인 추론결과를 수치적인 값으로 변환하는 비퍼지화기가 포함되어 있다.

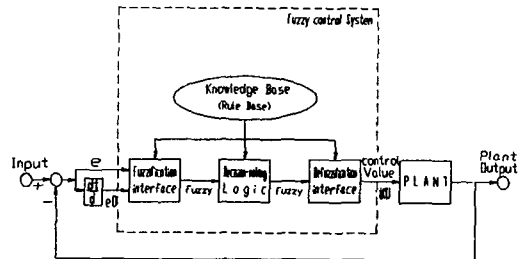


Fig. 2 Block diagram of Fuzzy controller

## 4. 결과 및 고찰

실시시험에 사용되는 시스템 모델의 인자값들은 일반적인 사양의 모델을 기준으로 참조하였다[2]. 시스템의 제어기를 적용한 결과는 Fig. 3-5과 같다. 위치제어에 대한 특성에서 PID제어기 보다 퍼지제어기의 경우가 상승시간이 빠르고 overshoot이 목표치 기

준으로 약 50%대 10%정도로 우수하게 나타났으며 settling time도 빠른 것으로 나타났다(Fig 3).

Table 1 Fuzzy control table

$\Delta e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

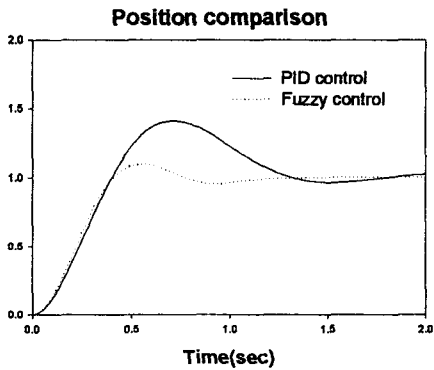


Fig. 3 Output position trend comparison

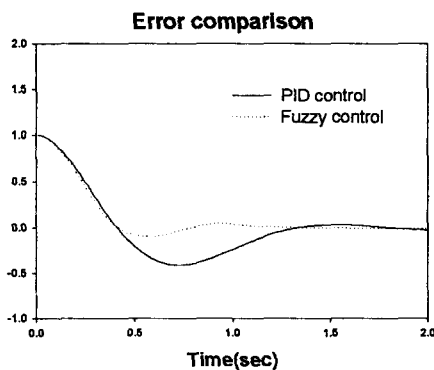


Fig. 4 Error trend comparison

유사한 유형으로 오차의 경향은 PID제어 보다 퍼지제어가 우수한 것으로 관찰되고 있으며 제어입력치의 경향을 참조적으로 비교할 수 있다.

일반적으로 선형 또는 비선형시스템에 제어기법

으로 활용되는 퍼지제어기는 모델의 정확성 및 제어 입력인자의 선정에 따라 성능이 달라지므로 기D제어기와 직접적인 비교가 어려우나 시스템의 비선형성이 중요한 인자로 작용할 것으로 예상되는 리니어모터 시스템에서는 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

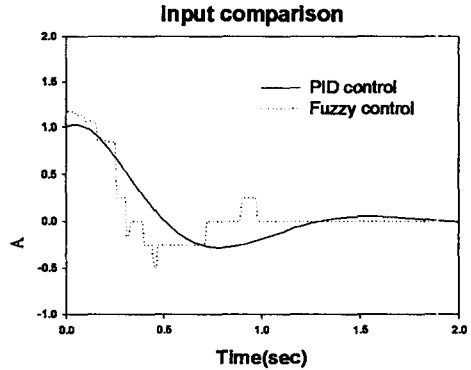


Fig. 5 Actuation input comparison

## 5. 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 학습 과정을 통해 파악한 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 여러가지 인자로 파악될 수 있으며 이를 위한 자료를 최소화하기 위하여 신경망기법을 사용한 민감도 분석을 통하여 최적측정인자를 정의하고자 한다.

## 참고문헌

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