

## 리니어모터 이송시스템의 2축제어특성에 관한 연구

유송민\*(경희대학교 기계·산업시스템공학부), 신관수(인천대 기계공학과)

### Two axis control characteristics of linear motor feed system

S.M. Yoo(Mech. Eng. Dept., KHU), K.S. Shin(Mech. Eng. Dept., ICC)

#### Abstract

Linear motor feed system control algorithm was extended to the two axis system. Among several factors considered, overshoot of the response was the most important one in minimizing position tracking error. Balance between overshoot and settling time has to be adjusted to guarantee to best tracking performance. Tracking route was carefully executed to eliminate the possible error during the machining process. Even though there exists slight discrepancy between desired route and cutting track at the corner, precision machining could be implemented using the cutting scheme introduced.

#### 1. 서론

생산현장에서 적용되는 가공시스템의 성능은 고정도, 고속화, 고효율화 되도록 개선되고 있다. 따라서 기존에 재래식 공작기계에 적용된 것보다 개선된 제반 기술이 요구되고 있으며 새로운 개념의 고속가공조건을 충족시키기 위하여 주축 및 이송계의 고속화가 필수적으로 달성되어야 한다. 이를 위하여 도입된 회전형태의 모터를 길게 펼쳐 놓은 구조의 리니어모터

는 자기부상열차에서 사용되는 것과 유사한 형식을 나타낸다. 이러한 리니어모터를 이용한 이송계는 공작기계에서의 각종 장작물이 장착된 운동부의 이송을 담당하게 된다. 리니어모터를 구동함에 있어서 볼스크류(ball screw)와는 달리 기계적인 요소가 배제되므로 여러 가지의 특성면에서 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 PID제어, 비선형제어 및 feedforward 제어기법 등 다양한 방법에 대한 특징이 비교되었다[1].

리니어모터 제어계를 구성하기 위한 시스템 모델링으로서 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 PID 기법도 시도되어 각각의 이득을 조정하기 위한

성능평가가 검토되기도 하였으며 외란(force disturbance)을 보상하는 feedforward 제어기법도 시도되었다[4]. 밀링가공에 MIMO  $H_\infty$  제어기를 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 리니어모터 및 모터제어기를 토대로 이에 적용시킬 수 제어 알고리즘 중 1축제어기에 적용된 결과를 활용하여 이를 2축제어 시스템에 적용시키며 활용된 결과를 분석하고자 한다. 이를 토대로 가장 효과적인 제어기법을 도출하고자 한다.

## 2. 이론적배경

### 2.1 시스템모델링

사용되는 리니어모터시스템의 일반적인 시스템모델링은 영구자석형 DC 리니어모터의 경우와 같이 기자력,  $F(t)$ 와 자기저항,  $R$ 의 식으로 표현된다[2]. 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.

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

### 2.2 제어기

신경망시스템은 본 연구에서는 시스템의 특성이 파악된 상태에서 제어기의 성능을 비교하기 위하여 일반적으로 활용되는 PID제어기의 개념을 활용하였다. 본 시스템에서 사용된 PID 제어기의 제어이득은 신경망시스템을 적용시켜 추출된 최적의 값을 적용시켰으며 이를 통하여 어느 정도의 안정적인 반응을 보장하는 것으로 확인되었다.

일반적으로 1축방향의 제어와 2축제어의 차이는 단일축방향의 위치의 미수렴 및 각 축의 동력학적 특성에 따른 기준궤적과의 오차가 발생할 수 있다는 것이다.

### 2.3 2축궤적의 형성

2축제어를 위한 일반적인 궤적은 임의의 교차각,  $\theta_c$ 를 갖는 2개의 1축궤적의 조합으로 구성되어 있다고 정의할 수 있다(그림 1).

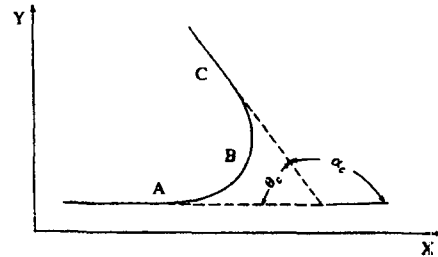


Fig. 1 2 axis trajectory

그림에서와 같이 점선으로 정의된 목표궤적을 구동시스템을 동력학적인 특성으로 인하여 효과적으로 추종하지 못하기 때문에 실제적으로는 이와 유사한  $A \rightarrow B \rightarrow C$ 의 궤적을 구현하여 추종오차를 유발하게 된다. 이러한 궤적을 추종하기 위하여 XY좌표에서의 각축 방향으로 독립적으로 구동된 결과를 조합하게 된다. 이때 X축방향으로는 일정한 방향으로 지향하는 구동을 구현하고 Y축방향으로는 일정시간 후 방향을 전환하여 구동한다. 일반

적으로 모서리부의 배열에 따라 각축의 구동 패턴이 달라지게 된다. 이러한 조합에 대한 각축의 속도는 다음 식으로 나타낼 수 있다. 즉

$$v(s) = k_c s + c_0$$

이때  $v(s)$ ,  $k_c$ ,  $c_0$  그리고  $s$  는 각각 속도, 상수 및 변수를 나타낸다. 이를 이용하여 각축방향의 위치제적은 다음과 같이 표현될 수 있다. 즉

$$x = x(s) = x_0 + \int_0^s \cos\left(\frac{1}{2} k_c s^2 + c_0 t + \theta_0\right) dt$$

$$y = y(s) = y_0 + \int_0^s \sin\left(\frac{1}{2} k_c s^2 + c_0 t + \theta_0\right) dt$$

### 3. 운전 및 제어조건

다양한 경우에 대한 응답특성을 분석하기 위하여 여러 가지 운전조건을 적용시켰다. 완만 및 급속운전조건을 위하여 가속도를 3, 6, 10  $m/sec^2$  의 세가지로 변화시켰으며 최대 운전속도를 0.3 및 0.6  $m/sec$  의 두 가지를 적용시켰다. 제어기는 가장 간단한 조건으로서  $\zeta = 0.707$  을 적용시키는 경우, 오버슈트(overshoot)가 없는 경우 및 오버슈트 응답이 부여된 경우의 세 가지를 적용시켰다. 이때 결정되는 제어이득은 신경망기법을 활용하여 결정하였다.

### 4. 결과

#### 4.1 1축 응답특성

단일축 속도추종특성에 대한 결과를 Figs. 2-7에 나타내었다. Fig. 2는  $\zeta = 0.707$  의 조건을 적용시켰다. Fig. 3은 PID제어를 적용시켰으나 오버슈트반응이 나타나지 않는 경우에 대한 결과이다. Fig. 4는 PID제어를 적용시켰으며 오버슈트가 존재하는 경우에 대한 속도 추종성을 표시하고 있다. Figs. 2-4는 가속도가 3  $m/sec^2$  로서 비교적 완만한 속도의 증가를 나타내고 있으며 Figs 5, 6는 가속도를 각각 6, 10

$m/sec^2$  로 증가시킨 경우에 대한 결과를 나타내고 있다. Fig. 2에서 속도 추종성이 가장 멀어지며 제시된 기준제적에 대하여 최대속도기준으로 약 85%에 달하는 것으로 나타났다.

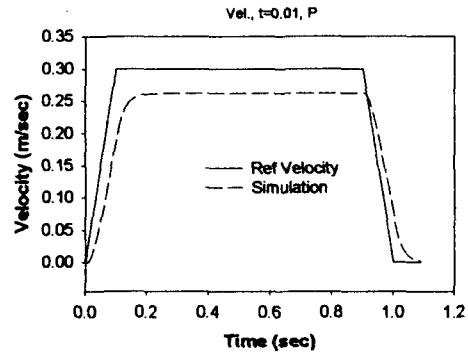


Fig. 2 Velocity response ( $\zeta = 0.707$ )

Fig. 3에서는 최대속도에 도달하고 있으나 도달시간에 지연되는 것으로 나타나고 있다. Fig. 4는 즉각적인 응답으로서 최대속도를 지나치는 오버슈트 응답특성을 보여주고 있다.

Figs 5-6에서의와 같이 가속도를 증가시키는 경우에는 이전보다 오버슈트가 최대속도기준으로 약 20-30% 증가하는 것으로 나타나고 있다.

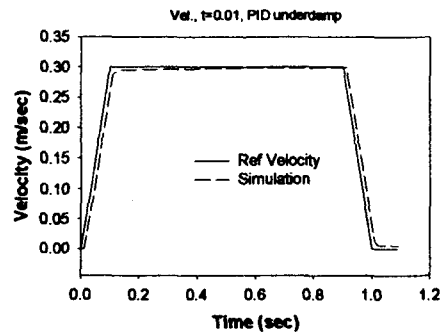


Fig. 3 Velocity response (No overshoot)

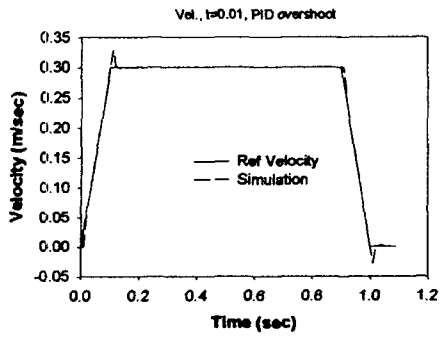


Fig. 4 Velocity response with overshoot  
(  $a = 3 \text{ m/sec}^2$  )

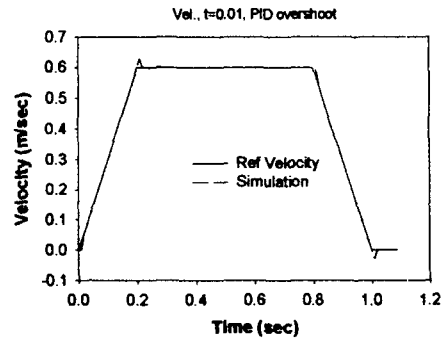


Fig. 7 Velocity response with overshoot  
(  $a = 3 \text{ m/sec}^2, V = 0.6 \text{ m/sec}$  )

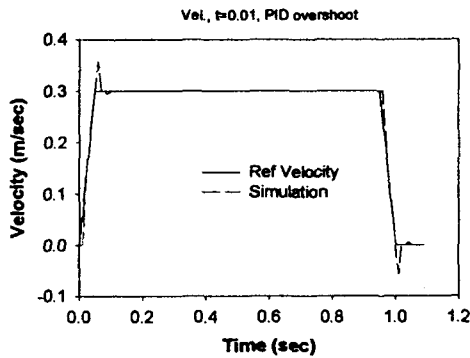


Fig. 5 Velocity response with overshoot  
(  $a = 6 \text{ m/sec}^2$  )

제어조건에 대한 위치오차는 차이를 나타내고 있다(Figs. 8, 9).

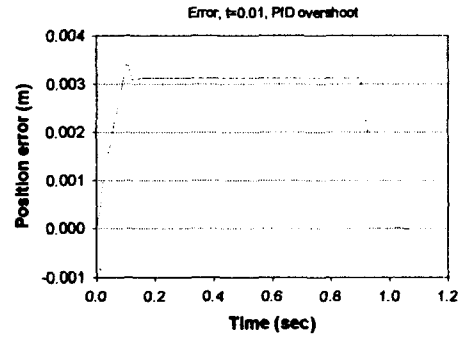


Fig. 8 Position error

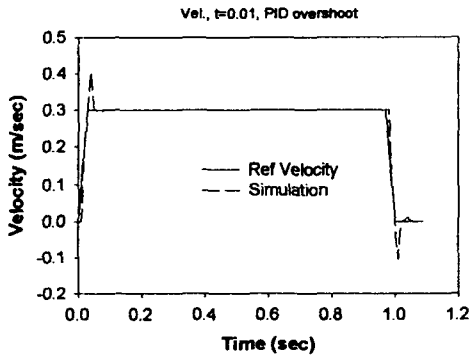


Fig. 6 Velocity response with overshoot  
(  $a = 10 \text{ m/sec}^2$  )

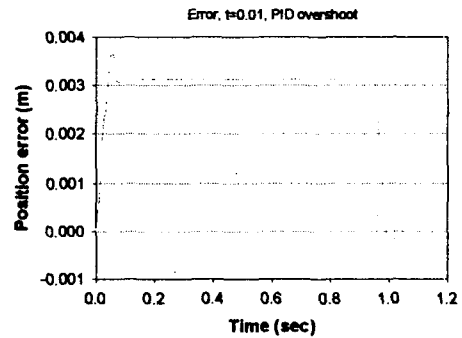


Fig. 9 Position error

Fig. 7은 가속도는  $3 \text{ m/sec}^2$  이고 최대속도를 증가시킨 경우에 대한 결과이다.

#### 4.2 2축 응답특성

단일축에서 유추된 결과를 확대하여 2축제어에 활용할 경우에 대한 위치 추종오차를 표시하여 비교하였다. Fig. 10은 Fig. 2의 결과를 2

축에 적용시킨 결과이다.

모서리 부분에서의 큰 오차를 나타내고 있으며 제어기의 성능이 개선된 Fig. 3을 확장하여 적용시킨 결과인 Fig. 11에서는 오차를 상당량 감소시킨 것으로 나타나고 있다.

Fig. 12는 Fig. 4와 같이 단일축에서 오버슈트가 있는 응답에 대한 결과를 조합한 것으로서 추종 궤적이 모서리부를 지나치고 있는 것을 나타내고 있다.

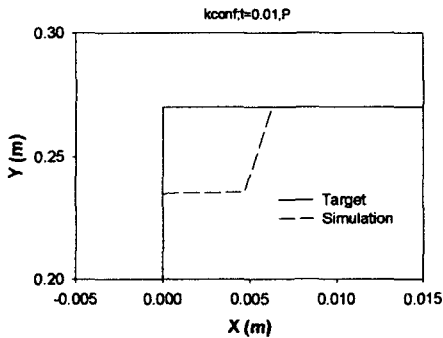


Fig. 10 Tracking trajectory ( $\zeta = 0.707$ )

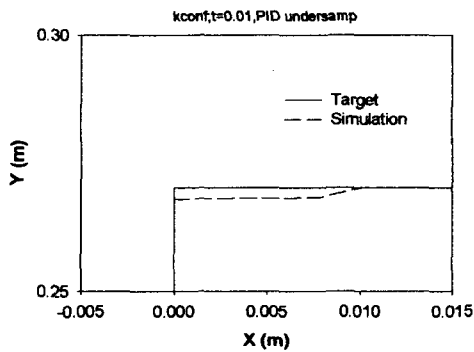


Fig. 11 Tracking trajectory without overshoot

가공물의 외형을 따라 공구가 이동할 수 있는 경우에 대한 추종오차를 분석한 결과가 Fig. 13와 같다.

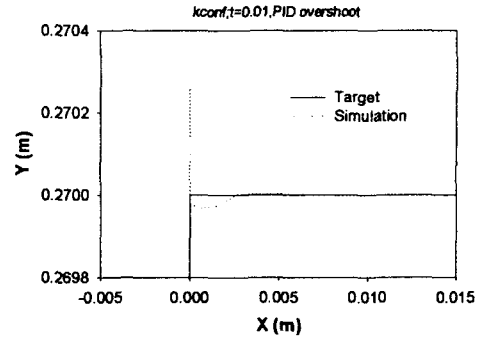


Fig. 12 Tracking trajectory with overshoot ( $a = 3 \text{ m/sec}^2$ )

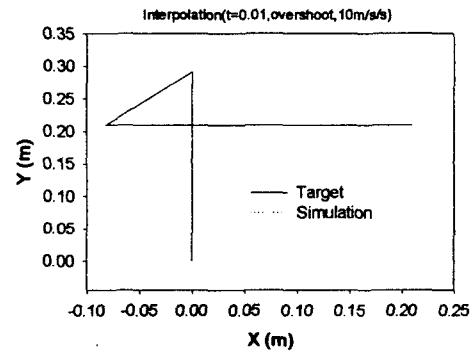


Fig. 13 Corner following trajectory

공작물의 품질에 영향을 미치지 않는 상부 및 좌측면 모서리에서의 궤적오차는 존재하나 공작물모서리는 최소한의 오차로 추종할 수 있다(Figs. 14, 15).

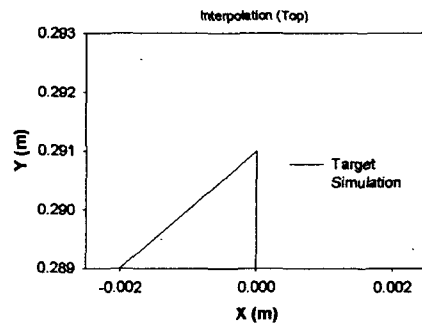


Fig. 14 Top trajectory

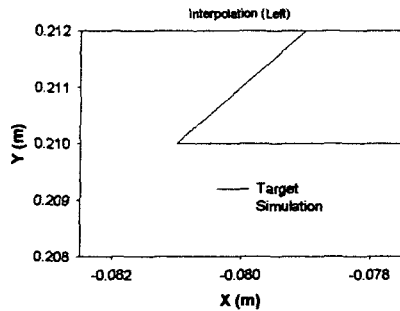


Fig. 15 Left corner trajectory

## 5. 결론

리니어 모터 이송시스템 2축제어에 적용시킨 결과에 대한 결론으로서 단일축 제어의 경우 가속도 증가에 따라 속도 응답의 overshoot 이 증가하였다. 또한 가속도 증가에 따라 최대 위치오차 증가하였다.

2축제어의 경우 가속도 증가에 따라 기준 궤적과의 오차가 증대하였다. 과도응답을 적용시킨 경우에 응답속도는 증대되나 이에 따른 오차가 존재하며 모서리부 가공시 오차를 최소화시켜야 하며 외측에서는 궤적의 조정으로 더욱 정밀한 가공이 가능하다.

## 6. 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