

공작기계용 리니어모터의 운동성능 평가에 관한 연구

A Study on Performance of Linear Motor for Machine Tools

최헌중*, 강은구, 정일용, 이석우

한국생산기술연구원
충남 천안시 입장면 홍천리 35-3

Abstract

Recently, linear motor has been developed for linear motion of machine tools. Linear motor is useful to design the linear motion, high speed and high accuracy, because of the simple system not required the additional mechanical part such as coupling and ballscrew.

This paper tested performance of linear motor relevant to motioning and positioning table such as F.R.F., step response and positional accuracy.

Linear motion system using linear motor requires the effective cooling system because it cause to decrease the positional error and to protect the motor coil. Therefore the positional error measurement was made to evaluate the effect of the temperature variation.

1. 서론

리니어 모터는 회전형 모터의 직선변환기구에 비해 기계적인 변환장치가 필요 없으므로 구조가 간단하며 신뢰성이 좋을 뿐만 아니라 기계적 백래쉬가 발생하지 않아 고속 고정밀 위치제어가 가능하다. 또한 공극에 있어 가동부 및 고정부가 비접촉 구동을 하므로 마찰이 없으며 소음이 적다. 그러나 리니어 모터는 공극을 일정하게 유지해야 하고, 회전형 모터에 비해 누설자속이 많이 발생하는 단점이 있다. 또한 공작기계 구조물과 직접 결합되기 때문에 발생하는 열이 구조물에 직접 전달된다. 따라서 열 발생은 리니어 모터의 성능을 저하시키

며 특히 고속 고가감속시 위치정밀도를 저하시키게 된다. 그러므로 리니어 모터의 성능을 극대화시키고 온도변화에 대한 위치정밀도를 향상시키기 위해서는 리니어 모터에서 발생하는 열에 대한 방열대책이 필수적이기 때문에 고비용의 냉각시스템이 필요하게 된다.

최근에는 리니어 모터의 열적거동의 최적화를 위하여, 실험 및 유한요소법을 이용한 리니어 모터의 냉각채널 설계 및 배치를 최적화하기 위한 연구를 진행되었으며^[1], 또한 유한요소법을 이용한 전압 및 공극에 변화에 대한 DC 리니어 모터의 자기장 해석, 전자기-열적, 정적 해석에 대한 연구도 수행되었다^[2].

본 논문에서는 동기식 리니어 모터의 운동 및 열특성을 평가하기 위하여 속도 및 가속도의 측정 실험과 전류, 속도, 위치제어시스템의 주파수 응답 특성 실험을 수행하였다. 또한 온도변화에 따른 위치오차 변화를 관찰하였다. 실험에 사용된 기계는 독일 KRAUSS MAFFEI에서 제작한 LIMES 800/240시리즈 리니어 모터이다.

2. 리니어모터의 운동성능 평가

2.1 실험 개요

일반적으로 공작기계용 이송장치로서의 리니어모터는 볼스크류와는 달리 기계적인 강성부에 의한 연결이 없으며, 고속 고정도로 테이블에 진동이 없게 직접 힘을 가할 수 있으며, 모든 기계의 전달요소 즉, 커플링, 베어링 등이 제거되므로서 이송계의 이너셔가 작아지며, 탄성계가 단순화 되고 강화되는 효과를 가져온다. 따라서 고속, 고가

감속 조건에서 운동특성이 매우 우수한 것 또한 리니어 모터의 장점으로 들 수 있다.

리니어 모터의 성능을 평가하기 위한 평가방안은 아직 확립되지 못한 상황이기 때문에 기존의 이송시스템의 평가방법을 이용하였으며, 기존의 이송시스템과는 달리 리니어모터의 경우 냉각시스템이 존재하기 때문에 냉각시스템에 따른 리니어 모터의 성능실험을 다양하게 실시하였다.

냉각 시스템에 따른 실험결과 적정유량과 적정 온도를 선정할 수 있었으며, 냉각수에 따른 테이블 및 모터의 특정 부위의 온도변화 특성을 얻을 수 있었다^[1]. 따라서 본 논문에서는 냉각수 온도에 따른 리니어 모터의 이송오차 발생여부를 실험하였으며 이에 대한 평가를 수행하였다.

또한 리니어 모터의 운동은 전류와 전류에 의해 발생하는 자기장에 의한 힘에 의해 발생된다. 따라서 리니어 모터의 운동특성을 평가하기 위해 전류의 주파수 특성을 분석하고, 테이블에 의한 속도 및 위치제어 특성을 살펴보았으며, 이송오차 평가를 수행하였다.

Fig. 1은 리니어 모터의 각 부위별 온도를 측정하기 위한 실험 장치구성을 나타낸 사진이며, 온도측정 센서로는 직경 0.13mm K-type 열전대를 사용하였다. 열전대는 리니어 모터 표면에 부착하여, 30채널 타점식 기록계로 온도를 측정하였다. 리니어 모터의 내부는 임의로 분해할 수 없으므로 열전대를 내부에 설치할 수 없었다. 따라서 외부 표면 온도와 냉각수 입출력부위를 측정하였다.

Fig. 2는 리니어 모터의 오차를 측정하기 위한 실험 장치구성사진으로 측정기는 HP의 레이저 인터페로미터(type : 5519A)를 이용하였다. 리니어 모터의 사양은 Table 1에 나타내었으며, 각축의 최대속도는 116m/min이며 x축 가속도는 15m/s² 이고 y축의 가속도는 40m/s²을 실현할 수 있다. 실제로 현재 공작기계용 이송계의 한계 속도가 60m/min이라고 할 때 이를 두배 정도로 뛰어넘는 속도이다. 리니어 모터를 이용하기 위한 제어기는 Siemens의 840시스템을 이용하였으며, 모터는 LIMES 800/240이 사용되었다. 리니어 모터의 위치제어를 위해 사용된 리니어 스케일의 경우 고속용 HEIDENHAIN의 LS486이 사용되었으며, 강한 진동에 견디기 위해 마운트 위에 설치되었다.

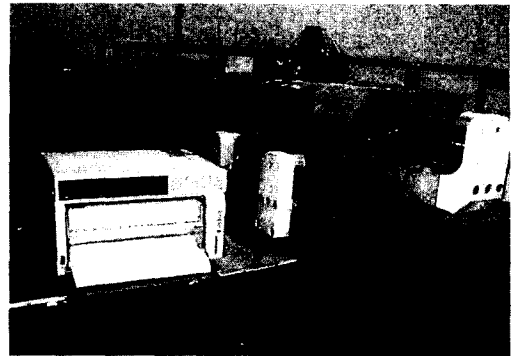


Fig. 1 Photograph of experimental setup for temperature measurement.

(Linear Motor : KRAUSS MAFFEI, Germany)



Fig. 2 Photograph of experimental setup for position error measurement.

Table 1 Technical Data of LIMES 800/240

	X axis	Y axis
Weight	675 Kg	230 Kg
Max. Axis Stroke	660 mm	530 mm
Max. Acceleration	15m/s ²	40m/s ²
Max. Velocity	116 m/min	116 m/min
Peak Force	14500 N	14500 N
Cont. Force	6600 N	6600 N
Stiffness	26000 N/μm	26000 N/μm

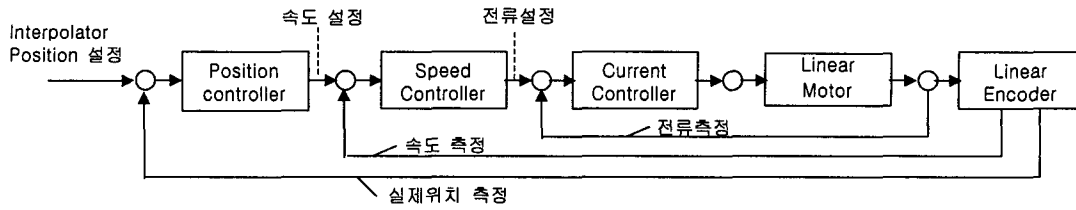


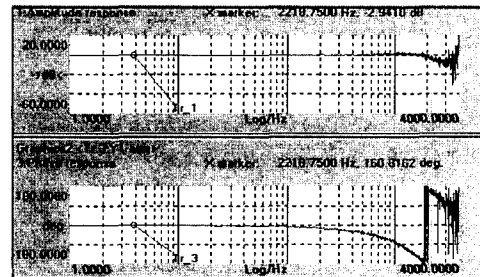
Fig. 3 Block diagram of control loop for Siemens 840D.

2.2 모터제어의 개요

리니어 모터의 제어성능에 따른 운동특성을 평가하기 위하여 제어선도를 살펴보면 Fig. 3과 같다. 가장 안쪽에 전류제어를 수행하며 그 다음 속도제어가 바깥쪽에서 수행되며 최종적으로 위치제어가 수행되고 있다. 따라서 전류의 주파수 응답특성과 단위 응답특성을 살펴보았으며, 그다음 속도 및 위치제어특성을 살펴보았다. 전류 제어의 cycle time은 0.06ms, 속도 제어의 cycle time은 0.125ms이며, 위치제어의 cycle time은 1ms로 상당히 빠르게 제어를 수행하고 있다.

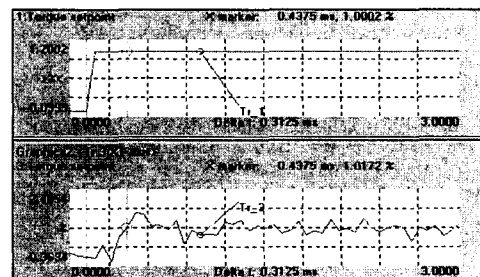
2.3 전류제어의 특성

리니어 모터는 빠르고 안정적인 제어시스템이 요구된다. 전류제어에 대한 주파수 응답 특성 실험을 실시하였으며 Fig. 4는 실험결과를 나타낸 Bode선도이다. 실험결과 X축 = 2460Hz, Y축 = 2220Hz 정도의 상당히 빠른 Bandwidth를 얻을 수 있었다. Fig. 5는 전류의 단위입력(최고전류의 1%=0.84A)에 대한 응답특성을 나타내었다. 실험결과 rising time은 X축과 Y축 모두 0.3125ms의 빠른 상승시간을 보인다. 그러나 정상 상태에서 심한 전류의 변동특성을 볼 수 있으며, 이는 저속에서의 속도변동을 유발할 수 있다.

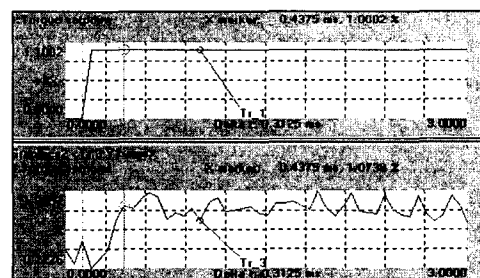


(b) Axis Y

Fig. 4 F.R.F. of current control loop

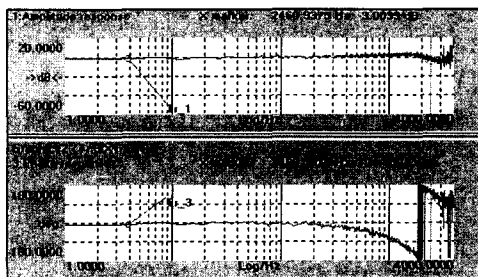


(a) Axis X



(b) Axis Y

Fig. 5 Step response of current control loop

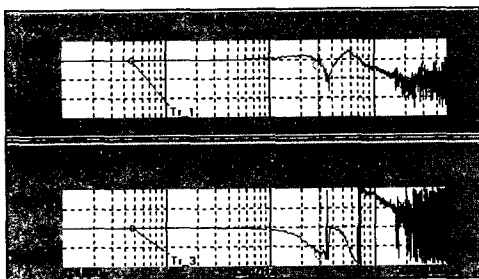


(a) Axis X

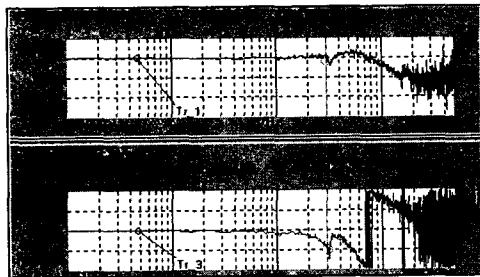
2.4 속도제어의 특성

리니어 모터의 속도제어에 대한 주파수 응답특성 실험을 실시하였다. Fig. 6는 주파수응답의 실험결과를 Bode 그래프로 나타내었다. 실험결과를 보면 X축과 Y축 모두 30Hz정도의 저주파 영역의 공진주파수가 발생하여 전체 이송계의 속도 제어 시 Bandwidth가 매우 낮아진다. 이는 실제로 공작기계의 이송시스템으로서 사용하기에 매우 적합하지 못한 결과이다.

Fig. 7는 테이블의 단위응답실험이다. 실험은 단위지령속도(1m/min)와 이에 따른 응답결과를 나타내었다. 실험결과 X축의 rising time은 7.3ms(가속도 $\approx 2.28\text{m/s}^2$)이며, Y축의 경우 6.6ms(가속도 $\approx 2.52\text{ m/s}^2$)이다. X축의 settling time(5%)은 80ms이며, Y축의 경우는 60ms 정도이다. Overshoot의 경우 X축은 70%, Y축은 50% 정도를 나타냈다. 단위응답특성결과 전체적으로 상당히 우수한 특성을 보였으나 X축의 경우 overshoot가 상당히 크게 발생됨을 확인할 수 있었다. 이는 X축의 경우 두 번째에 발생된 피크에서 발생되기 때문이며, 향후 원인규명이 필요할 것 같다.

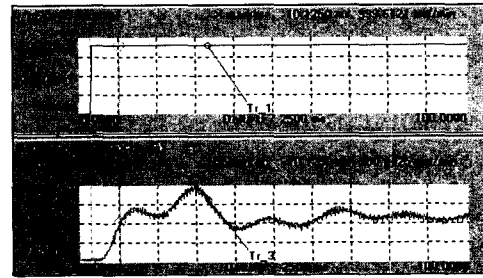


(a) Axis X

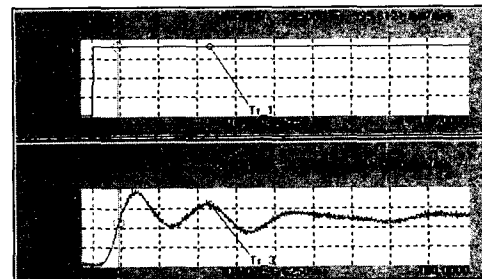


(b) Axis Y

Fig. 6 F.R.F. of velocity control loop



(a) Axis X

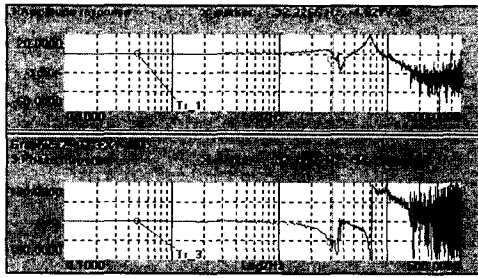


(b) Axis Y

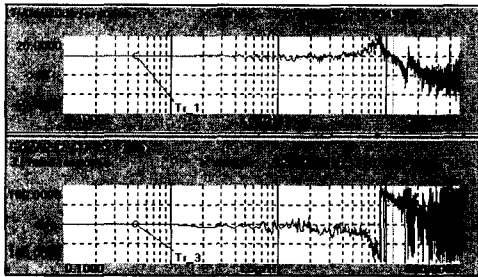
Fig. 7 F.R.F. of velocity control loop

Fig. 8은 P-gain의 상승 시 속도제어루프의 주파수응답특성 결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 6의 실험에서 저주파영역에서의 공진주파수 문제가 발생하였기 때문에 P-gain에 따른 특성변화를 살펴보았다. 실험결과 X축에서의 저주파수 영역에서 발생된 공진주파수는 변화가 없었으나, Y축의 경우 30Hz정도의 공진주파수 영향이 제거되었다. 이의 결과로 유추해볼 때 저주파수의 모드가 X 방향에서 영향이 크며, 30Hz정도의 저주파수임을 감안해 볼 때 질량이 큰 구조물에 기인한 결과로 평가된다. 따라서 향후 모드해석에 의한 평가가 수행되어야 할 필요성이 있으며, 저주파수의 공진 문제가 해결될 경우 100Hz정도의 속도제어 Bandwidth를 가질 수 있을 것 같다.

Fig. 9은 계인의 상승시 단위응답측정 결과이다. 측정결과에서 보면 심한 진동이 발생하여 적정치 못한 계인설정임 알 수 있다. 이 또한 구조물에 기인하여 계인상승시 이러한 진동을 유발한 것으로 판단되며, 향후 모드실험을 통한 규명이 필요할 것 같다.

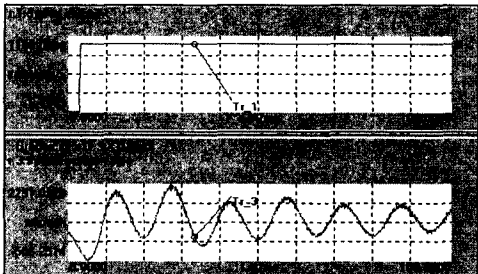


(a) Axis X (P-gain :12->18)

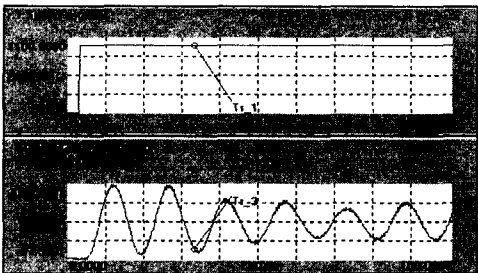


(b) Axis Y (P-gain :6->9)

Fig. 8 F.R.F. of velocity control loop where changes P-gain



(a) Axis X (P-gain :12->18)

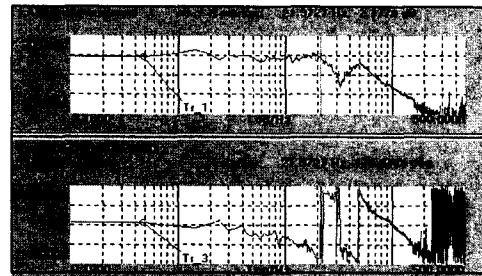


(b) Axis Y (P-gain :6->9)

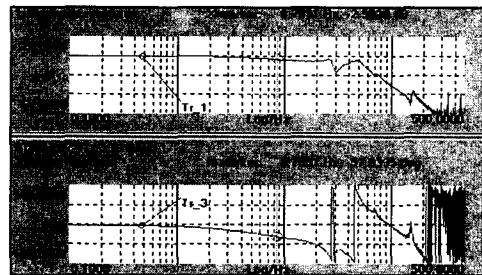
Fig. 9 Step response of velocity control loop where changes P-gain

2.5 위치제어의 특성

Fig. 10은 리니어 모터의 위치제어에 대한 주파수 응답특성 실험결과를 나타내었다. 실험결과 X축의 bandwidth는 22Hz이며, Y축의 경우 9Hz정도이다. 이는 원호보간시나 복잡한 윤곽가공시 following error가 심하게 일어날 수 있기 때문에 gain을 올려야 될 필요성이 있으나, gain 상승시 구조물의 강성약화로인한 심한 진동유발이 발생되어 gain을 더 이상 키우지 못하였다.



(a) Axis X



(b) Axis Y

Fig. 10 F.R.F. of position control loop

2.6 최대속도 및 가속도 측정

Fig. 11은 리니어 모터의 최대속도 및 가속도를 측정한 결과이다. 측정결과 최대속도는 대략 120m/min정도가 나왔으며, 이때의 가속도는 40m/s^2 이 측정되었다. 최대속도의 경우 리니어 스케일의 측정속도의 제약 때문에 속도를 더 이상 올릴 수 없는 한계를 가졌다.

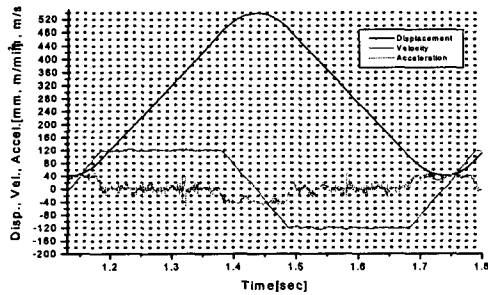


Fig. 11 Measurement of position, speed and acceleration profile at maximum speed command

2.7 온도변화에 따른 위치오차변화

Fig. 12는 이송 테이블을 중앙에 위치시킨 후 정지상태에서 1초 간격으로 20분 정도의 테이블 정지시 위치오차 측정을 수행한 결과이다. 실험결과 임의의 주기를 가졌으며, 이는 냉각기의 구동주기와 일치하였다. 또한 위치오차의 변화 양상은 냉각수의 온도변화 양상과 유사함을 알 수 있었다. 따라서 리니어 모터 내부의 온도변화에 따라 위치오차가 발생할 수 있으며, 현재 냉각수의 온도 변화폭이 대략 2°C임을 감안할 때, 위치오차에 냉각수 온도의 변화가 민감함을 알 수 있다. 따라서 냉각수의 온도제어가 좀더 세밀히 수행되어야 할 필요성이 있다. 또한 시간이 흐름에 따라 음의 기울기를 가짐을 알 수 있다. 이 결과는 추후 리니어 모터 전체의 온도변화를 확인한 후 명확한 원인을 판단할 필요가 있다.

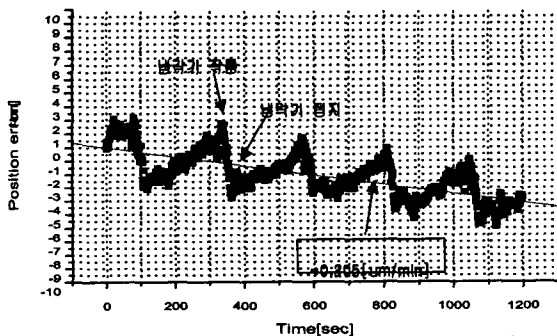


Fig. 12 Measurement of position error according to thermal expansion

3. 결론

리니어 모터의 운동성능평가방법은 아직 명확히 확립되지 못했기 때문에 좀더 많은 연구가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 일반 이송계 성능평가방법인 주파수응답특성 및 단위응답특성을 살펴보았다. 또한 기존의 회전형 모터와 달리 리니어 모터는 열변형에 비대칭적 구조이기 때문에 모터의 열변형 오차가 위치오차로 부각될 수 있는 구조이다. 이를 규명하기 위해 정지상태에서의 위치오차를 측정하였다. 위의 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 첫째, 전류의 응답성은 빠르나 노이즈 특성 때문에 속도제어를 정밀하게 할 수 있는 제어 특성은 줄어든다.
- 둘째, 속도제어시의 bandwidth가 저주파영역의 고유진동수로 인해 매우 작다. 이는 공작기계용 이송계로서는 치명적이므로 구조적인 고유 진동수문제를 해결하여 한다.
- 셋째, 위치제어시의 bandwidth가 매우 작기 때문에 복잡한 윤곽가공시의 following error가 수반된다. 이는 구조물의 강성이 약하기 때문인 것으로 추측되며 이를 보강하기 위한 대책이 필요하다.
- 넷째, 모터내부의 온도변화에 따른 위치오차가 발생하므로 보다 정밀한 냉각수의 온도 제어가 필요하다.

후기

본 논문은 중기거점 과제에서 연구비를 지원 받아 수행되었습니다.

4. 참고문헌

1. In-Ung Eun, Optimierung des thermischen Verhaltens von elektrischen Linearmotoren für den Einsatz in Werkzeugmaschinen, Shaker Verlag, 1999
2. "Planning Guide of Linear Motors," Siemens.
3. "리니어 모터 응용 핸드북," 세화, 1988.