

## 리니어 모터의 위치 정밀도 향상에 관한 연구

민경석(고려대), 오준모(고려대), 최우천(고려대)

### A Study on Enhancement of the Position Accuracy of a Linear Motor

Kyung S. Min (Mech. Eng. Dept. Korea Univ.), Jun M. Oh (Mech. Eng. Dept. Korea Univ.),  
Woo C. Choi (Mech. Eng. Dept. Korea Univ.)

#### ABSTRACT

There are various sources causing a position error in a linear motor. This paper focuses on error sources from rotational motions of a table and friction. Rotational errors occur due to imperfections during manufacturing and/or assembly of guide ways, and cause a position error at locations of interest. Friction is another factor deteriorating the position error due to its highly nonlinear behavior. The position error of the linear motor was about 20~30 $\mu$ m. After compensating the position errors due to rotational error motions and friction, the remaining errors become about 6~8 $\mu$ m and 2~3 $\mu$ m, respectively. It is shown that the positional accuracy of a linear can be greatly improved by compensating the two error sources.

**Key Words** : Linear Motor; Rotational Error, Friction, Error Compensation

#### 1. 서론

리니어 모터는 회전형 모터의 원형 구조를 직선으로 전개한 구조를 가지며, 전기 에너지를 직선 운동 에너지로 직접 변환하여 추력을 발생시킨다. 회전형 모터를 사용하는 직선 이송 기구들은 회전 운동을 직선 운동으로 바꾸는 변환 장치를 필요로 하는데, 이 때문에 기존의 회전형 모터를 사용하는 직선 이송 기구들은 복잡한 구조를 가지게 되고, 마찰에 의한 소음 및 에너지 손실이 발생하며, 낮은 기계 효율과 정밀도의 제한이 따르게 된다. 리니어 모터를 사용하는 직선 이송 기구들은 이와는 달리 직선 변환 장치가 필요 없으므로 회전형 모터를 사용하는 이송 기구에 비해 간단한 구조, 저 소음 그리고 낮은 에너지 손실을 가지게 되며, 좀 더 고정밀의 위치 제어를 가능하게 한다. 반면 리니어 모터는 지지 구조물을 따로 필요로 하고, 회전형 모터에 비해서 고가이지만 고속 및 고정밀 위치 제어 기술이 발전함에 따라 리니어 모터에 대한 요구는 점차 증가하고 있는 추세이다.

리니어 모터의 정밀도를 저해하는 요인으로는 여러 가지가 있으나, 일반적으로 계통 오차와 임의

오차로 나눈다. 계통 오차는 반복적으로 발생하며, 그 때문에 원인 규명과 보상이 쉽다. 계통 오차는 그 원인 및 현상에 따라 기하학적, 열변형 및 기계적 오차로 다시 분류한다. 기하학적 오차는 가공 및 조립시의 정밀도에 영향을 받기 때문에 제작 오차로 분류되기도 하며, 제작 과정 이후에 시스템이 원래 가지게 되는 오차라고 할 수 있다. [1] 열변형 오차는 주로 내부 및 외부의 열원에 의해 발생하는 열변형에 따른 것이며, 시간에 따라 변하는 오차이다. 일반적으로 열변형 오차는 열변형 오차 모델을 이용해서 보상할 수 있다. [2-4] 임의 오차는 보통 반복적으로 발생하지 않기 때문에, 원인 규명이 쉽지 않으며, 그 보상도 쉽지 않다.

일반적으로, 서보 기구에서 마찰은 원치 않는 Stick-Slip 현상을 유발하고, 위치 정밀도를 떨어뜨린다. 마찰은 저속 영역에서의 비선형성이 매우 크기 때문에 예측이 어렵지만, 보다 정밀한 위치 제어를 위해서는 반드시 고려되어야 한다. Dahl [5] 은 속도의 함수로서의 마찰력을 제안하였고, 정지 마찰 시에 스프링처럼 거동하는 동마찰 모델을 제안했다. 그러나 Dahl 의 모델은 저속영역에서 속도가 증가함에 따라 마찰력이 감소하는 Stribeck 현상을 고려

하지 않았다. Karnopp [6] 는 저속영역에서 기존의 마찰 모델이 가지는 문제를 해결하기 위해 물체간의 상대 속도의 크기에 따라 정지 마찰 모드와 운동 마찰 모드를 전환하는 모델을 제안했다. Armstrong-Helouvy [7]는 저속 및 고속 영역에서의 Stick-Slip 현상을 나타낼 수 있는 모델을 제안하였다. 나중에 Canudas [8] 가 Stribeck 현상, 이력현상 및 최대 정지 마찰력의 변화를 모두 고려하는 동마찰 모델을 제안하였다.

기존의 계통 오차에 관한 연구는 주로 회전형 모터를 사용하는 서보 기구를 대상으로 진행되어 왔지만, 리니어 모터를 사용하는 이송 기구에 대해서는 비교적 연구가 충분히 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 리니어 모터의 위치 오차를 연구하였으며, 많은 오차의 원인 중에서 다음 두 가지 회전 오차와 마찰 오차에 대해서 연구하였다.

## 2. 회전 오차의 측정 및 분석

일반적으로 직선 이송 기구는 3 개의 병진 운동 성분과 3 개의 회전 운동 성분(roll, pitch, yaw)을 가진다. 리니어 모터와 같은 1 축 이송 기구에서 리니어 가이드는 제작 또는 조립시의 결함으로 인해 이송축이 이상적인 직선에서 벗어나게 되며, 이동자는 약간의 기울기를 가지게 된다. 이 때 이동자는 회전 오차 성분을 가지게 되고, 이것이 아베 옵셋에 의해 이송축을 따라서 위치 오차 성분을 발생시킨다. 회전에 의해 발생하는 위치 오차는 회전 중심에서부터 측정지점까지의 거리에 비례하며, 특히 레이저 간섭계 같은 측정 기구를 위치 오차 측정에 사용할 경우 회전 오차 성분은 매우 중요해 질 수 있다. Fig. 1 은 회전 오차를 측정하기 위한 실험 장치를 나타냈다. 측정 장치로 레이저 간섭계를 사용했으며, 이송축은 x 축이고 이동자는 이송축을 따라서 운동하고 있다. 반사경은 이동자에 고정되어 있고, 위치 측정 엔코더는 베드에 부착되어 있다. 사용된 리니어 모터는 JTMD10 이며 엔코더의 분해능은 1 $\mu$ m 이다. 레이저 간섭계는 ML10 Laser 를 사용했으며 간섭계의 분해능은 0.1 $\mu$ m 이다.

피치 길이 110mm, 요 길이 30mm 에 대해 이송축의 전 이송 구간에 걸쳐 회전 오차 성분을 측정했으며, 이를 Fig. 2 에 나타냈다. 엔코더의 측정 위치가 정확하다 하더라도 회전 오차 때문에 이동자가 정확하지 않은 위치에 있을 수도 있게 된다. 결과적인 위치 오차는 식 (1)에 의해 계산되며, 회전 오차 성분에 각 길이 성분이 곱해진다.

$$e_{rot} = -(l_p \sin \varepsilon_p + l_y \sin \varepsilon_y) \quad (1)$$

여기서  $e_{rot}$  간섭계에서 측정되는 회전 오차에 의한 위치 오차를,  $\varepsilon_p$  은 피치 오차 그리고  $\varepsilon_y$  은 요 오차를 나타낸다. Fig. 3 은 요 길이 30mm 에 대해서 피치 길이를 각각 110mm, 120mm 및 140mm 로 했을 때의 위치 오차의 측정값과 예측값을 비교하고 있다. 위치 오차의 예측값은 식 (1)에 의해 계산했고, 피치 길이가 증가함에 따라 위치 오차도 증가하는 경향이 나왔다. 이 결과를 통해서 아베 옵셋에 의해 회전 오차가 위치 오차로 나타나고 있으며, 레이저 간섭계 같은 측정 장치를 사용하게 될 경우 회전 오차가 위치 오차의 주요한 오차 성분이 된다는 것을 알 수 있다. 이 경우 위치 오차 측정 시 반드시 피치 길이와 요 길이가 명시되어야 한다. 또한 롤 오차 성분은 이송축인 x 축의 위치 오차에 아무런 영향을 미치지 않으므로 고려 대상에서 제외시켰다.

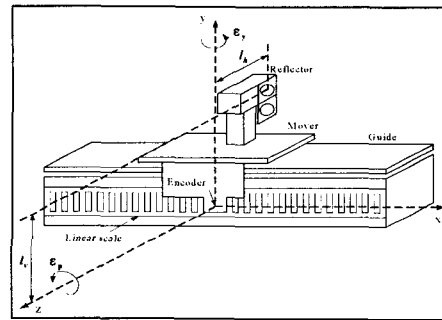


Fig. 1 Setup for measurement of rotational errors

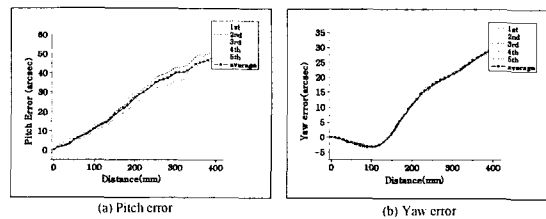


Fig. 2 Measured pitch and yaw errors

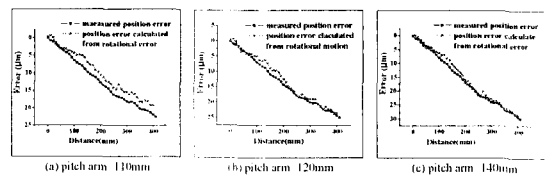


Fig. 3 Measured and predicted position errors with respect to varying pitch arms

### 3. 마찰 오차 및 정지 시의 제어 오차 분석

#### 3.1 마찰 오차 보상

마찰은 윤활 상태와 상대 속도의 영향을 받는다. 마찰은 저속 영역에서 Stribeck 현상이 발생하기 때문에 매우 큰 비선형성을 나타낸다. 이 때문에 적절한 마찰 모델을 선정하는 것이 어렵지만, 저속 및 고속구간에서의 마찰 특성을 적절히 나타내는 몇몇 마찰 모델이 제안되었다. [5-8] 리니어 모터 시스템에서 마찰력은 입력 전류에 의해 발생한 추력에서 다른 힘의 성분을 제거함으로써 구할 수 있다. 마찰력을 구하기 위해서 리니어 가이드 전 구간에서 윤활 상태가 일정하다는 가정을 한다. 리니어 모터 시스템에서 발생하는 힘들은 다음과 같다: 관성력, 외력, 리플힘 그리고 마찰력. 다음의 식은 리니어 모터 시스템에서의 힘의 평형을 나타낸다.

$$f(t) = m\ddot{x} + f_{load} + f_{fric} + f_{ripple} = K_f I \quad (2)$$

윗 식에서  $f(t)$  는 전류 입력으로부터 발생된 추력,  $m\ddot{x}$  은 관성력,  $f_{ripple}$  은 리플힘 그리고  $f_{load}$  는 리니어 모터에 가해진 외력을 나타낸다. 시스템에 가해진 외력이 없을 경우 식 (2)는 다음과 같이 다시 정리된다.

$$f_{fric} = K_f I - m\ddot{x} - f_{ripple} \quad (3)$$

$K_f$  는 전류 상수이고  $I$  는 입력 전류이다. 등속 구간에서 관성력  $m\ddot{x}$  는 0 이므로 마찰력은 입력 전류와 리플힘만 측정한다면 구할 수 있게 된다. 속도를 변화시켜 가면서(0.001~0.1m/s) 리니어 모터에서 발생하는 힘을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 4 에 나타냈다. 리플힘의 영향은 사인파 형태로 나타나고 있으며, 평균화(averaging)를 통해 리플힘의 영향을 제거해서 최종적으로 마찰력을 얻을 수 있다. 실험을 통해 얻은 마찰력을 속도의 함수로 정의된 마찰식에 적용시키기 위해 Canudas[8]에 의해 제안된 마찰식을 사용했다. 다음의 식은 Canudas 에 의해 제안된 마찰식이다.

$$f_{fric} = -[f_c + (f_s - f_c)e^{-(\dot{x}/\dot{x}_s)^2} + f_v\dot{x}]sign(\dot{x}) \quad (4)$$

윗 식에서  $f_c$  는 쿨롱 마찰 계수,  $f_s$  는 정지 마찰 계수,  $f_v$  는 점성 마찰 계수 그리고  $\dot{x}_s$  는 경계 속도이다. 마찰력은  $\dot{x}_s$  보다 저속 영역에서는 비선형적으로 감소하고, 이보다 높은 속도 영역에서는 속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다. 커브 피팅에 의해 필요한 계수들의 값을 구하고 앞의 식 (3)을 다시 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$f_{fric} = -[4.2147 + (6.7419 - 4.2147)e^{-(\dot{x}/0.01)^2} + 13\dot{x}]sign(\dot{x}) \quad (4)$$

실험 결과와 이를 피팅한 결과를 Fig. 5 에 나타냈다. PMAC(Programmable Multi Axes Controller)의 마찰 보상 옵션을 적용하여 추력을 제어해서 전체 오차에 대한 마찰 오차의 영향을 구할 수 있다.

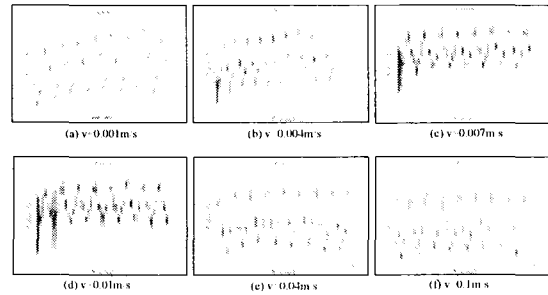


Fig. 4 Measured forces for various velocities (0.001~0.1m/s)

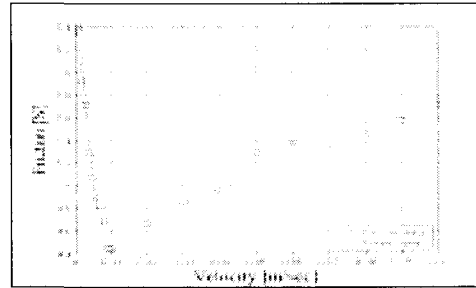


Fig. 5 Experimental friction data versus curve fitting result

#### 3.2 정지 시의 제어 오차

아래의 Fig. 6 은 전원을 공급한 경우와 공급하지 않은 경우의 레이저 간섭계에서 측정된 위치를 나타낸다. 전원이 공급된 경우 진폭이 약 3 $\mu$ m 의 진동이 발생하고 있으며 이는 정지 시에도 리니어 모터에 제어 신호가 작동하고 있음을 보여주고 있는 것이며, 이에 해당하는 오차의 경우 리니어 모터의 구동 시 불가피하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

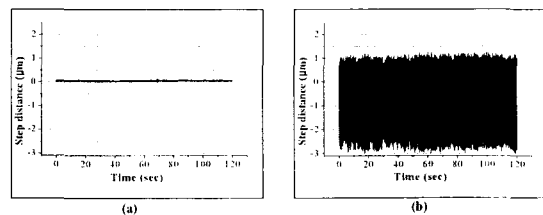


Fig. 6 Position measured with (a) power off (b) on

#### 4. 결론

오차를 보상하기 전과 보상한 후의 위치 오차를 Fig. 7에 나타냈다. 오차 보상 전의 전체 위치 오차는 약 20~30 $\mu\text{m}$ 이었다. 회전 오차에 의한 영향을 보상한 후의 위치 오차는 6~8 $\mu\text{m}$ 이 되며, 마찰력에 의한 오차를 보상하게 되면 약 2~3 $\mu\text{m}$ 의 위치 오차가 남게 된다. Fig. 6에서 나타낸 것처럼 리니어 모터에 제어 신호가 작동하고 있는 중의 내재된 위치 오차가 약 2~3 $\mu\text{m}$ 이므로, 회전 오차와 마찰에 의한 오차 성분을 보상함으로써 리니어 모터의 위치 정밀도가 상당히 향상됨을 알 수 있다.

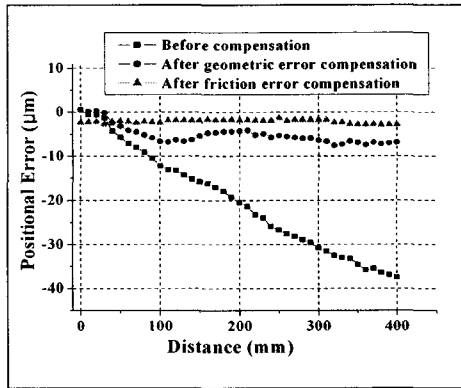


Fig. 7 Position error after rotational and friction error compensations

#### 참고문헌

1. 정일용, 강은구, 이석우, 최현중, "공작기계 고속 이송용 리니어 모터의 열 특성에 관한 연구", 한국정밀학회, 춘계학술대회, pp. 98-101, 2001
2. M. A. Domenez, "A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation," Precision Eng., Vol. 8, No. 4, pp. 187-196, 1986
3. M. Matsuo, "High-speed test of thermal effects for a machine-tool structure based on model analysis", Precision Eng., April Vol. 8, No. 2, 1986
4. M. C. Show, "Thermal effects on the accuracy of numerically controlled machine tools", Annals of the CIRP, Vol. 35, No. 1, 1986
5. P. Dahl, "A solid friction model", Aerospace Corp., El Segundo, CA, Tech. Rep. TOR-0158(3107-18)-1, 1968
6. D. Karnopp, "Computer simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems", Trans. ASME, Vol. 107, pp. 100-103, 1985
7. B. Armstrong-Helouvy, "Frictional Lag and Stick-

Slip", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1448-1453, 1992

8. C. Canudas de Wit, H. Olsson, K. J. Astrom, P. Lischinsky, "A New Model for Control of Systems with Friction", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 40, No. 3, pp. 419-425, 1995