

Linear Motor의 열변형 오차해석 및 실험

최우혁*, 민경석, 오준모(고려대 대학원 기계공학과), 최우천, 홍대희(고려대 기계공학과)

Thermal Deformation Error Analysis and Experiment of a Linear Motor

Woo Hyuk Choi, Kyung Suk Min, Jun Mo Oh(Dept. of Mech. Eng., Graduate School, Korea Univ.), Woo Chun Choi, and Daehie Hong (Dept. of Mech. Eng., Korea Univ.)

ABSTRACT

Thermal deformation errors in a linear motor system are known to be much more influential than the geometric errors. Also, heat sources in a linear motor system affect the linear-scale that is a crucial component in position control. Therefore, reducing the thermal errors in the system is very important for high accuracy position control. This study proposes the method for predicting the thermal deformation error of a linear motor system using FEM analysis, and the prediction results are compared with experimental results by using multiple regression method.

Key Words : Linear Motor (선형모터), Accuracy (정밀도), Position error (위치오차), Thermal Deformation (열변형), Finite Element Method (유한요소해석), Multiple Regression Method (다변수 회귀법)

1. 서론

최근 산업구조는 고속, 고정밀화 되어 가고 있다. 이에 대응하여 산업기계의 정밀도와 생산성을 향상시키기 위한 방법으로 리니어모터의 발전이 급속하게 향상되어가고 있다. 리니어모터의 가장 중요한 특징으로는 direct drive 기능, 즉 직선운동의 직접구동이 있다. 기존의 직선이송장치를 구현하기 위해서는 볼스크류와 기어등의 부속장비가 필요하다. 그러나 그에 따른 문제점으로 마찰열과 각 기구의 기하학적 오차를 수반하게 된다. 반면, 리니어모터의 장점으로는 고속, 정밀위치 결정과 비접촉 구동, 신뢰성, 환경성, 비소음, 수직 구동 등을 들 수 있으며 단점으로는 지지기구를 필요로 하고 누설자속이 많으며, 고비용, 효율, 역률이 회전형 모터보다 일반적으로 낮다는 점등을 들 수 있다. 또한, 고속, 고정밀에 요구되는 현대 산업기술 사항에 부응하기 위하여 그와 관련 기술들이 발전되고 있다.

그러나 고정밀을 추구하는데 있어 수반되는 오차들이 있는데, 특히, 초정밀기구에서 기하학적 오차(Geometric Error)와 열변형 오차(Thermal Error)는 가장 큰 영향을 미치는 오차요인이다. 기하학적 오차는 위치와 형상에 관계되는 기계의 오차로서 기계의

가공 정밀도와 조립방법에 의존하게 된다. 이는 소프트웨어적인 위치오차 보정방법으로 보정 할 수 있다. 그리고 열변형 오차는 내부적인 열원과 외부적인 열원에 의해서 발생하는 여러 가지의 열변형 오차들을 포함하고 있다. 리니어 모터를 기계장치에 장비한 운전은 대부분의 경우 왕복 위치결정 용도에 이용된다. 연속 반복운동시 온도 상승에 의해 기계의 온도가 올라가기 때문에 위치결정에 영향이 나타나게 된다.^[1]

리니어 모터에서의 주요 발열원인은 코일부의 전 기적 에너지의 변화로 발생한 열과 리니어 이송 가이드 부분의 볼베어링의 마찰열이나, 본 연구에서는 그 모든 부분을 고려하기란 쉽지 않고 마찰열에 의한 영향은 상대적으로 작아서 리니어 모터 코일의 발열만을 고려하였다.^[2] 특히, 코일부에서 발생한 열이 전도(conduction) 및 대류(convection)에 의해 리니어 스케일이 부착되어 있는 가이드부분의 열변형을 유발시켜 명령 위치제어값과 실제 위치제어값의 차이를 발생시킨다고 생각하였다.

본 연구는 리니어모터에 관한 기초실험연구로서 코일부에서 발생하는 발열량이 리니어 스케일에 전달되는 열에 의해 변형되는 오차를 실험을 통하여 데이터를 수집해 다변수 선형 회귀법(multiple linear

regression method)을 이용한 모델링과 비교 분석하였고, 유한요소법을 이용한 해석과 측정값의 비교를 통해 모델링을 검증하였다.

2. 이론적 배경

공작 기계의 적용 예를 들어보면 열변형 오차가 전체 오차의 40~70%를 차지한다고 알려져 있을 만큼 중요한 요소로 대두되고 있다. 공작기계의 각 부분의 온도 분포는 공작기계의 구조와 연관되어서 열변형 오차를 형성하는 중요한 인자로 여겨지고 있으나, 공작기계의 열변형 오차를 완전히 없애는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 그래서 온도분포를 이용한 열변형 모델링을 적용하고, 열변형 오차를 예측하기 위한 여러 가지의 연구가 이루어지고 있다.

열변형 오차의 보정에 관한 연구는 과거에 많은 연구가 이루어지고 있는데, M. A. Donmez는 CNC선반에 대해서 열변형 오차의 보정을 위해서 동차 행렬식(Homogeneous Coordinate Transformation)을 이용하여 입체 오차 방정식을 정의하고 각각의 오차성분을 공작기계 선반 온도의 함수 위치의 대표값을 요소로 하는 다항식을 모델로 하여 열변형 오차를 보정했다.^{[3],[5]} 또한 입체 오차의 측정을 22개의 직선만을 측정하여 진직도, 직각도, 각오차등을 쉽게 얻을 수 있는 알고리즘을 소개하였다. M. C. Shaw는 열탄성 방정식을 이용하여 열변형에 대해서 연구하고 수치적인 모델링을 통하여 열변형 거동에 대하여 연구하였다.^[4] 열변형에 대한 연구는 구조물의 온도를 측정하여 이들의 함수로 오차를 추정하는 모델을 세워 실제 기계에 적용하는 연구를 소개하고 있는데 각각의 공작기계의 특성마다 그 형태가 다르기 때문에 모델의 선정에 어려움이 있다. 그러나, 최근 많은 연구 결과로서 대표적인 방법들이 이용되고 있는데, 다변수 선형 회귀법(multiple linear regression method), 신경회로망(neural network)등이 그 대표적인 모델링 함수들이다.

리니어 모터에 관한 기초연구 실험으로써 본 논문에서는 리니어 모터의 고속 운전시 위치에 따른 열변형 오차에 관한 경향과 온도분포를 확인한다. 또한 과거 연구에 많이 적용, 검증되어 온 다변수 선형 회귀법(multiple linear regression method)을 이용하여 실험값과 모델링 예측값을 비교해 보기로 한다.

수치 해석적인 방법에 의하여 다변수 회귀 분석을 다음과 같이 기술할 수 있다. 즉, 통계적인 접근을 통해 적어도 두 개 이상의 독립변수로부터 종속변수 값을 예측할 수 있다. 그래서 이 모델은 열변형 오차의 변화에 의한 거동을 보여 주는 데 식(1)로 표현된다.

$$y = a_0 + a_1u + a_2 u^2 + a_3v + a_4uv + a_5 v^2 \quad (1)$$

u : temperature rise at linear guide

v : temperature rise at coil

y : thermally induced position error at specific position

3. 실험

3.1 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치는 1축 공심형 리니어 모터를 사용하였다. 측정시스템은 Renishaw사의 레이저 간섭계(정밀도 10nm)와 Yokogawa사의 온도 검출장치(Temperature data logger: DA100)이며 실험에 사용된 리니어 모터의 사양은 Table.1과 같다.

본 실험에서는 열전대(thermocouple)를 Fig. 1에서와 같이 리니어 스케일 및 코일부에 부착하여 온도 변화를 측정하였다. 단, 리니어 스케일에는 열전대를 부착하기가 어려워 스케일에 가장 가까운 부분에 부착하였다. 온도변화의 측정은 K형의 열전대를 사용하였으며, 실험환경은 대기온도가 $24^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$, 상대습도 $55.9 \pm 3\%$ 되는 환경에서 실험하였다.

Table.1 Specification of JTM10-420.

| Parameter | value |
|---|---------------------------|
| Max. force | 220N |
| Continuos force | 74N |
| Max. speed | 3m/s |
| Max. acceleration | 5G |
| Position repeatability | $\pm 1\mu\text{m}$ |
| Absolute position accuracy | $4\mu\text{m}$ |
| Distance code-type encoder | $1\mu\text{m}$ resolution |
| Stroke | 420mm |
| Servodrive, JTD MCS (Motion Control Sys.) | |

○ Manufacturer : (주) JUSTEK

○ Model : the coreless moving coil-type brushless DC linear motor (JTM10-420)

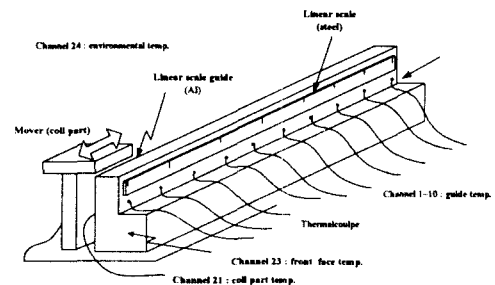


Fig. 1 Experimental settings.

먼저 측정에 앞서 리니어 모터의 기하학적 오차를 보정하기 위해 오차값을 측정하였다. 그리고 인터페이스 프로그램을 통해 $\pm 1\mu\text{m}$ 이내의 정밀도에 맞추어 보정을 하였다. 리니어 모터의 온도 상승시간을 줄이기 위해 이동부에 부하질량 2kg을 올려 놓고 그에 맞는 게인값을 조정하여 이동부를 가동시켰다. 이때의 모터 운동 조건은 속도 2m/s, 가속도 30m/s²이다. 온도검출기를 통해 각 시간당 리니어 스케일 가이드의 온도변화를 측정하고 각각 1시간당 50mm씩 위치 오차를 측정하였다.

3.2 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 다음과 같은 두가지 관점에서 리니어 모터의 열변형 오차를 분석하였다. 첫 번째로 유한요소해석법을 이용하여 리니어 가이드의 변형이 안쪽면과 바깥면의 온도차에 의한 굽힘현상이 있었었고, 그에 따라서 리니어 스케일의 변형을 초래하여 위치오차를 발생시킨다는 점을 제시했다.

리니어 가이드의 온도변화측정값은 Fig. 2와 같다. Fig.2에서 보면 초기 1~2시간 내에 온도 상승률이 커지다가 그 이후에는 감소함을 볼 수 있고, 그 이후 시간이 증가하더라도 상승률은 거의 일정하게 유지되므로 5시간이후 온도는 고려하지 않았다. 또한 열원인 코일부가 가장 높게 나타나고 있고, 가이드부(ch1~10)의 온도는 전체 길이에 걸쳐 균일하게 분포됨을 알 수 있다. Fig.3에서는 대표 지점의 열변형 오차를 보여 주고 있는데 400mm에서 가장 큰 오차값을 보여 주고 있다.

유한요소해석결과는 Fig. 4에서와 같이 코일부의 온도와 가이드부의 온도 차이로 인한 열변형 차이로 길이에 따라 점차 오차가 증가함을 볼 수 있다. 이것은 리니어 가이드부분(Al)의 열팽창과 굽힘 현상으로 볼 수 있다. 또한, 상대적으로 열팽창 계수가 작은 리니어 스케일(Steel)도 같이 열팽창과 굽힘이 일어난다고 볼 수 있다. 그래서 실험 측정값에서 보듯이 해석결과값과 그 오차 경향은 유사함을 알 수 있다.

유한요소 해석은 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하였으며 Fig. 5에서처럼 리니어 스케일 가이드부의 온도 차이분포를 주었다. 그래서 열변형은 Fig. 6과 같이 열팽창과 굽힘현상으로 인한 열변형을 확인할 수 있었다. 가이드와 리니어 스케일부가 접촉되어 있으며 알루미늄과 철의 열팽창계수는 다르지만, 유한요소해석 결과값은 가이드와 리니어 스케일이 같이 변형됨을 보여 준다.

두 번째로는 시간에 대한 열변형 오차를 다변수 회귀법을 이용해서 예측하는 알고리즘을 개발하여 오차를 계산하였다.

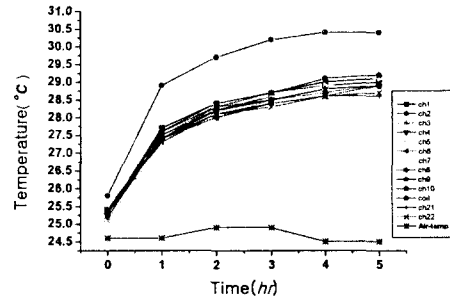


Fig. 2 Temperature changes at the linear scale guide.

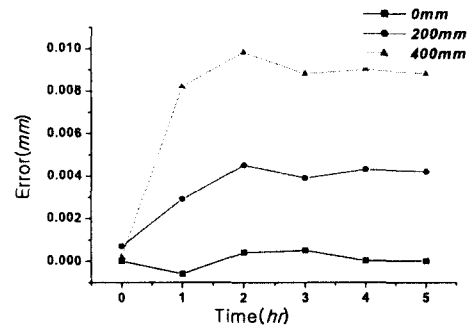


Fig. 3 Position errors with respect to time.

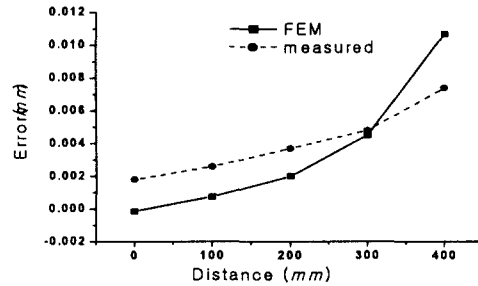


Fig. 4 Measured and predicted deformations.

다변수 회귀법(multiple regression method)을 적용하여 대표적인 변수값 즉, 200mm, 400mm, 코일부 지점의 시간에 따른 온도와 오차값을 사용하여 열변형 오차모델을 만들었다. Fig. 7은 200mm에서의 측정값과 계산값을 비교하여 거의 비슷한 결과값을 얻을 수 있었다.

그러나, 2시간이후에는 그 오차값이 대략 1 μm 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 굽힘 현상이 다소 완화 되는 것으로 여겨진다.

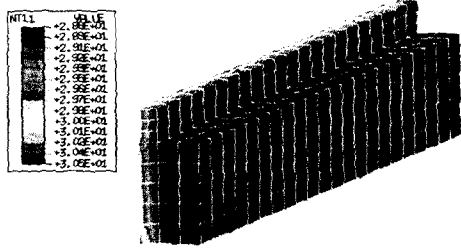


Fig. 5 Thermal distribution of linear scale guide.

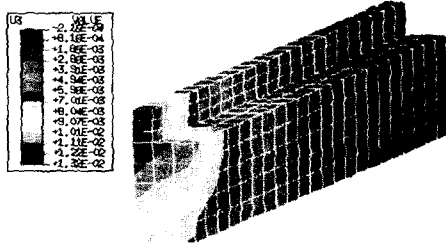


Fig. 6 Thermal deformation of linear scale guide.

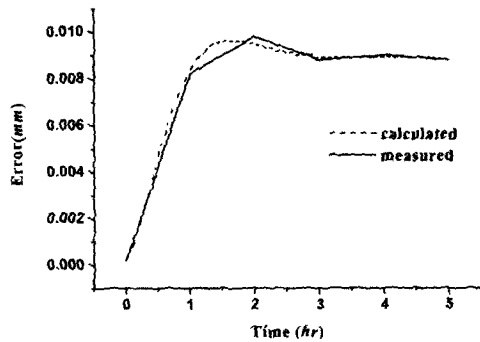


Fig. 7 Comparison of predicted and measured errors.

4. 결론

본 연구는 리니어 모터의 기초연구로서, 리니어 스케일의 변형으로 인해 위치오차가 발생함을 확인하였다. 그래서 열변형 오차의 경향과 모델링을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

온도측정값과 위치오차값을 이용하여 다변수 회귀법에 의한 열변형 오차 모델링을 하였고, 이를 실험값과 비교함으로써 근사한 결과치를 얻을 수 있었

다. 그러므로 이를 통해서 열변형에 의한 오차를 비교적 정확하게 예측 할 수 있다. 그리고 유한요소법 이용한 해석의 오차값과 실험값이 비슷한 경향을 가지고 있음을 확인하였다. 향후 신경회로망이론을 이용한 모델과 열적 모달 분석(thermal modal analysis) 모델을 리니어 모터에 적용하여 최적의 열오차 보정 알고리즘을 개발하고자 한다.

후기

본 연구에 기술자문과 도움을 주신 (주)JUSTEK 관계자 여러분에게 감사의 말을 드립니다.

참고문헌

1. 莉田 充二, "리니어 모터의 특징과 특성", 월간 기계설계, 2000년 5월호, PP.102~108
2. 정일용, 강은구, 이석우, 최현중, "공작기계 고속이송용 리니어 모터의 열 특성에 관한 연구", 한국정밀학회, 2001 춘계학술대회, pp.98~101.
3. M. A. Donmez, D. S. Blomquist, R. J. Hocken, C. R. Liu, and M. M. Barash, "A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation," *Precision Eng.*, Vol.8, No.4, pp.187-196, 1986.
4. M. C. Shaw, "Thermal effects on the accuracy of numerically controlled machine tools", *Annals of the CIRP*, Vol.35, No.1, 1986.
5. 이석원, "CNC 공작기계의 스피들과 이송축 열변형 오차의 측정 및 보정시스템 개발에 관한 연구", 서울대 기계설계학과 박사논문, 2000.