

정밀 공작기계용 리니어모터 모멘트의 해석 및 실험적 검증

조영택, 조한욱, 이승한
충남대학교

Analysis and Experimental Verification of Linear Motor Moment for Precision Machine Tools

Young-Taek Cho*, Han-Wook Cho*, Seung-Han Lee*
Chungnam University*

Abstract - This paper presents the characteristic analysis and experiment of pitching moment in permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) for precision machine tools. In this paper, we define force characteristics of the moment and the moment analysis by the finite element method. Manufacture experiment and we will compare the results of finite element analysis and experimental results.

1. 서론

최근 산업이 발전함에 따라 고속 운전과 정밀 위치 제어가 가능한 직선운동 전동기의 적용 분야가 급격히 증가하였다. 직선운동 전동기는 가동부와 고정자가 접촉하지 않아 소음 및 마찰이 적고 빠른 가속 특성을 가지며, 높은 위치 정확도 및 낮은 주행 오차를 가지고 있어 공작기계, 자기부상열차, 반도체 생산설비, 반송 장치, 공장 자동화 설비 등의 여러 분야에 활용되고, 특히 높은 기저력의 영구자석을 이용한 선형 전동기의 연구가 활발히 이루어지고 있다.

직선운동용 공작기계는 주로 볼스크류나 리니어 모터에 의해 구동된다. 리니어 모터가 적용되는 공작기계의 경우, 비접촉, 직접구동(direct drive)가 가능하여 백래쉬(backlash)가 없고 유지보수가 용이하며, 고속/고정도 구동이 가능한 많은 장점을 가진다. 그러나, 철심형 리니어 모터의 경우 최대추력의 3배에서 5배에 이르는 큰 수직력(또는 흡인력 : attractive force)에 의한 이송계의 변형, 치-슬롯 형상에 의한 수직력의 불균형과 맥동을 가지게 되며, 이로 인해 등속구동이 어렵고 모멘트가 발생하여 공작 시 표면의 평면이 일정하지 않으며, 주기적인 각운동오차를 유발하는 문제점을 가지고 있다. 특히, 대형 초정밀 가공기에서는 큰 부하에 높은 운동정밀도가 요구되므로 코깅 모멘트(cogging moment)에 의한 각운동오차를 최소화 하는 것이 매우 중요하다[1][2].

본 논문에서는 선형 운동을 통해 초정밀가공에 적용되는 선형운동유니트의 정밀도 예측 시뮬레이터 개발의 일부로, 정밀 공작기계용 리니어의 운동 정밀도에 영향을 주는 코깅요소 중에 코깅 모멘트의 유한요소법(Finite Element Method : FEM)에 의한 해석과 모멘트 실험 결과를 비교하여 타당성의 유무를 판단하였다.

2. 리니어모터의 모멘트

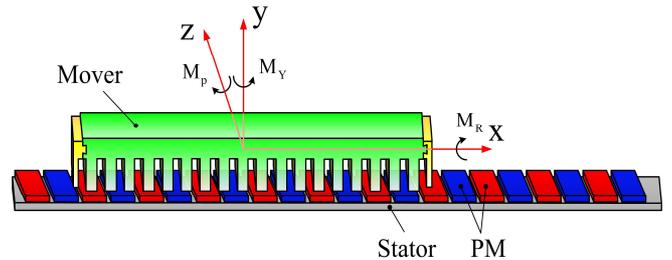
2.1 모멘트의 힘 특성 정의

그림 1은 리니어 모터의 모멘트의 구조를 나타낸다. Z축을 중심으로 반시계 방향으로 회전하는 피칭(pitching) 모멘트와 X, Y축에 대하여 시계방향으로 회전하는 롤링(rolling) 및 요잉(yawing) 모멘트로 정의되며, 본 논문에서는 피칭모멘트의 힘 특성을 해석하였다.

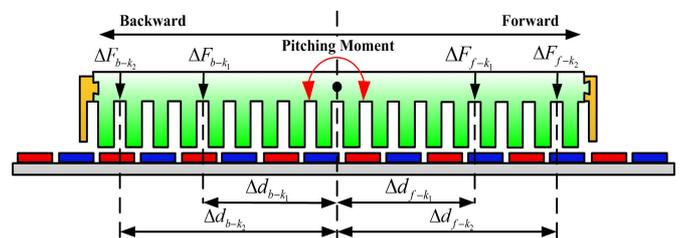
공작기계에 사용되는 영구자석 선형동기전동기(permanent magnet linear synchronous motor : PMLSM)에서 철심형 이동자의 전면에서 발생하는 흡인력은 이동자의 진행 방향과 같은 방향의 힘으로서, 이동자를 고정자 측으로 끌어 들이는 힘으로 작용하여 이동자를 가속시킨다. 또한 이동자의 후면에서 발생하는 흡인력은 이동자의 진행 방향과 역방향의 힘으로서, 이동자를 고정자 측으로 되돌리는 힘으로 작용하여 이동자를 감속시킨다. 그림 1은 공작기계용 리니어 모터의 모멘트 정의를 나타낸다. 이동자의 모멘트는 철심형 이동자의 진행방향에 대하여 영구자석과 이동자 사이에서 자력의 수직방향 성분이 이동자의 중심에서 좌우로 불균등하게 분포하여 발생하는 흡인력의 맥동으로 인해 발생하는 힘의 불균형이며, 이동자의 앞부분과 뒷부분에서 발생하는 흡인력 맥동과 힘이 발생하는 위치의 곱을 이용하여 식 (1)과 같이 계산 할 수 있다[3].

$$F_{moment} = \Delta d_n \times \Delta F_{normal_n} \quad (1)$$

또한 모멘트는 이동자의 중심으로부터 앞부분과 뒷부분에서 발생하는



〈그림 1〉 리니어 모터의 모멘트 구조



〈그림 2〉 리니어 모터의 모멘트 정의

〈표 1〉 리니어 모터의 사양

Parameter	Value	Parameter	Value
Mover Height	34mm	Mover Length	216mm
Slot Height	20.5mm	Stack Length	35mm
Slot Width	5mm	Teeth Width	7mm
Slot Pitch	12mm	Air-Gap	1mm
Pole Pitch	18mm	Magnet Thickness	4mm
Magnet Length	15mm	Magnet Width	35mm

흡인력의 합인 식 (2)와 같이 표현 할 수 있다.

$$M = \sum_{n=1}^{n_s} [\Delta F_{f-n} \Delta d_{f-n} - \Delta F_{b-n} \Delta d_{b-n}] \quad (2)$$

표 1은 피칭모멘트의 해석을 위한 영구자석 선형동기전동기의 사양을 나타낸다. 12극 18슬롯, 이동자와 고정자간의 공극 1mm, 극 피치 18mm의 구조를 가지고 있으며, 디텐트력 저감을 위해 보조치가 적용되어 있는 리니어 모터이다.

2.2 모멘트의 유한요소해석 방법

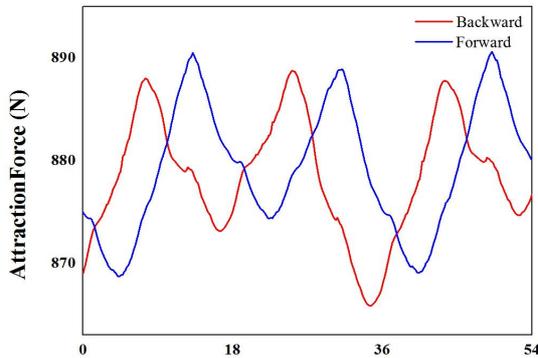
본 논문에서 모멘트의 수치 해석적 계산은 상용 전자장 유한요소해석 S/W인 Ansys Maxwell v.16를 사용하였다. 직선구동 리니어 모터의 이동자에서 흡인력의 맥동에 의해 발생되어지는 모멘트는 리니어 모터 이동자의 회전력(토크)의 계산에 의해 얻어질 수 있다. 즉, 실제 리니어 모터에서 고정되어지는 부분(영구자석 및 강자성체 플레이트)을 이동시키고, 이동되어지는 부분(모터 철심 및 권선)의 중심에 회전축을 두어 회전력의 계산이 가능하도록 하였다. 또한, 리니어 모터의 중심축을 기준으로 전면부와 후면부에서 발생하는 흡인력을 각각 해석하여 식 2와 같

이 모멘트를 계산하였다.

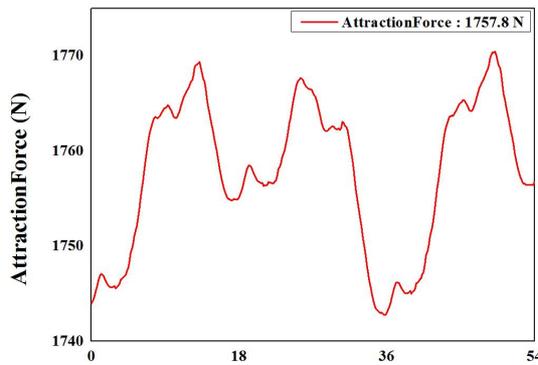
2.3 모멘트의 유한요소해석법에 의한 계산

그림 3은 리니어 모터의 전면부(forward)와 후면부(backward)에서 발생하는 흡인력과 리니어 모터의 전체 흡인력이다. 유한요소해석법을 이용하여 모멘트를 계산하기 위해 모터는 고정하고 영구자석 및 강자성체 플레이트를 이동할 때, 리니어 모터의 전면부와 후면부에서 발생하는 흡인력을 합하여 전체 흡인력이 1757.8 N(Average)로 계산되었다.

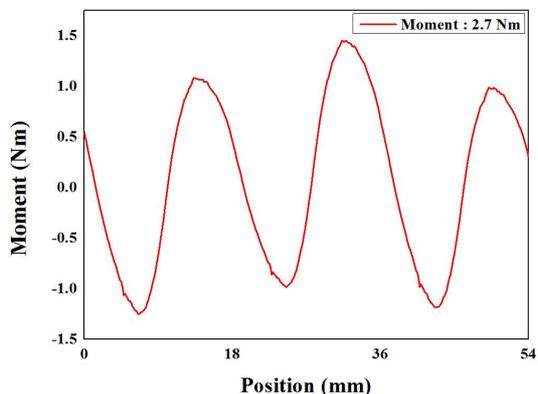
그림 4는 리니어 모터의 모멘트이다. 모멘트는 리니어 모터의 중심을 기준으로 모터의 앞뒤로 발생하는 흡인력의 맥동과 힘이 발생하는 위치를 곱하여 계산하였다. 리니어 모터의 전면부와 후면부의 흡인력의 위상 차이로 인해 후면부가 전면부보다 흡인력이 크면 뒤로 기울기가 발생하고, 반대로 전면부의 흡인력이 후면부보다 크면 흡인력의 차이만큼 모터의 앞으로 기울기가 발생한다. 따라서 모멘트는 전면부에서 발생하는 흡인력에서 후면부의 흡인력의 차이와 힘이 발생하는 위치를 곱하여 계산하였다. 극 피치 18mm마다 주기성을 가지며, 2.7 Nm(Peak to Peak)의 모멘트가 발생하였다.



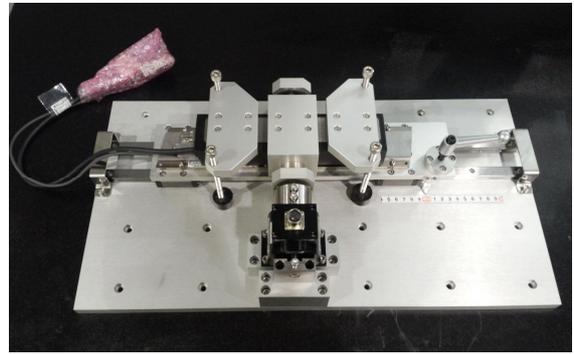
(a) 전면부와 후면부의 흡인력



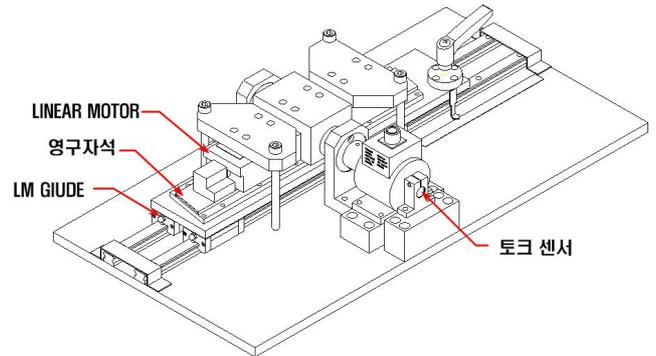
(b) 리니어모터의 전체 흡인력
〈그림 3〉 리니어 모터의 흡인력



〈그림 4〉 리니어 모터의 모멘트



(a) 모멘트 실험장치 실제 형상



(b) 모멘트 실험장치 구성도
〈그림 5〉 리니어 모터의 모멘트 실험장치

2.4 모멘트 실험장치 구성

그림 5는 피칭모멘트를 측정하기 위해 설계한 시험장치의 구성도를 나타낸다. 모멘트 실험 장치는 리니어 모터의 중심을 고정시킨 상태에서 중심축과 토크센서를 커플링으로 연결하고 모터를 지지하는 4개의 긴 볼트를 이용하여 모터와 영구자석간의 간격을 유지한 상태에서 볼트를 제거 후 모터를 수평상태로 모터와 영구자석간의 공극을 유지하면서 LM Guide를 움직일 때 리니어 모터 중심에서 발생하는 비틀림을 토크 센서로 측정한다. 모터의 이동거리를 확인할 수 있는 실험장치의 우측 표시장치를 참고하여 일정한 거리만큼 LM Guide를 이동하면 모터 중심에서 발생하는 비틀림을 토크센서로 측정하여 모멘트를 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 공작기계용 리니어모터의 운동 정밀도에 영향을 주는 코킹요소 중 모멘트의 힘 특성을 분석하고 유한요소해석법을 이용하여 계산된 모멘트를 모멘트 실험결과와 비교하였다. 모멘트의 힘 특성 정의 및 예측설계한 유한요소해석 모델의 구조와 해석방법을 제시하였다. 유한요소해석 결과로 피칭모멘트가 계산되었고, 모멘트를 검증하기 위해 실험장치를 구성하였다. 본 논문의 후속연구로, 유한요소해석 결과를 실험을 통해 검증하여 선형운동유니트의 정밀도 예측 시뮬레이터 개발에 적용할 것이다.

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “기계장비 정밀도 시뮬레이션 플랫폼 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.
(No. 10033528)

[참 고 문 헌]

- [1] K. G. Lim, “Detent force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor,” *IEEE Trans. on Magnetics*, pp. 1157-1160, 2002.
- [2] L. S. Jung, “Analysis of forces in a short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor,” *IEEE Trans. Energy Conv.*, pp. 1365-1270, 1999.
- [3] C. Han, “Analysis on the Moment force Characteristic of a Linear Machine with Permanent Magnet,” M.Sc. Thesis, Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, 2012.