

선형 운동 공작기계의 가공오차 저감을 위한 리니어 모터의 힘 특성 해석

조한욱*, **한 철***, 최장영*, 최상규**, 박철훈**, 장석명*
 충남대*, 한국기계연구원**

Force Characteristic Analysis of Linear Motor to Reduce Manufacturing Error in A Linear Motion Machine Tool

Han-Wook Cho*, Cheol Han*, Jang-Young Choi*, Sang-Gyu Choi**, Cheol-Ho Park**, Seok-Myeong Jang*,
 ChungNam National University*, Korea Institute of Machinery & Materials**

Abstract - In order to predict the accuracy of the linear motion machine tools, the force characteristics such as the detent force, the attraction force and the moment are estimated by analytical method or FEM. In this paper, we proposed the analytical calculation process for the force characteristics of a linear motor. The analytical results are good agreement with FEM one. They could be used for the precision prediction simulator with the information of linear bearings, encoders, etc.

1. 서 론

정밀가공 또는 초정밀 가공을 위한 공작기계는 공구나 가공대상을 이송하기 위한 선형운동 유니트로 구성되어 있다. 선형운동 유니트는 베어링, 이송기구, 변위센서, 동력전달요소, 모터 등이 결합되어 대상을 원하는 방향과 위치로 직선 이동시키는 단위조립체이다. 운동정밀도 관점에서 베어링의 경우 레일의 가공오차, 레일의 탄성변형, 마찰 및 불/롤러의 치수오차 등이 주요한 요인이고, 이외에 레일의 조립오차 및 볼스크류의 조립동심도, 리니어 모터의 디텐트력, 흡인력 맥동, 모멘트 등이 주요한 요인으로 작용한다. [1]

본 논문에서는 선형 운동을 통해 초정밀가공에 적용되는 선형운동유니트의 정밀도 예측 시뮬레이터 개발의 일부로, 리니어 모터의 디텐트력, 흡인력, 모멘트 등의 힘특성을 해석적으로 예측하고자 한다. 정밀도 예측 시뮬레이터는 베어링, 리니어모터, 엔코더 등의 모델 및 구성요소의 정보와 가공오차/조립오차, 운전조건 등을 DB 및 대화창을 통해 사용자가 입력하면 직선운동 유니트의 운동정밀도를 예측해주는 S/W이다.

리니어 모터의 힘특성 해석을 위해서 보통 유한요소해석(FEM)이 주로 적용되고 있지만, 기계 가공을 수행하는 작업자가 빠른 시간내에 공작기계의 정밀도를 예측하기 위해서는 빠른 해석시간을 갖는 등가자기회로 해석법이나 맥스웰 방정식을 기초로 하여 해석 해를 도출하는 해석적기법의 적용이 DB 구축 및 S/W 개발을 위해서는 훨씬 용이하다. 따라서, 본 논문에서는 리니어 모터의 디텐트력, 흡인력 특성 예측을 위해 공간고조파해석법을 적용하고, 해석결과를 FEM과의 비교를 통하여 해석결과와의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

선형운동 공작기계에 적용되는 리니어 모터는 일반적으로 철심형 이동자 코어와 영구자석 고정자를 갖는 구조이다. 리니어 모터의 디텐트력, 흡인력의 맥동은 이들 철심형 이동자와 영구자석 고정자 사이의 에너지 분포의 불균형에 의해 발생한다. 그림 1은 본 논문에서 적용된 철심형 이동자를 갖는 리니어모터이며, 현재의 해석단계에서는 고정자의 스류, 이동자의 보조슬롯 등을 제외한 상태에서의 힘특성이 예측되었다.

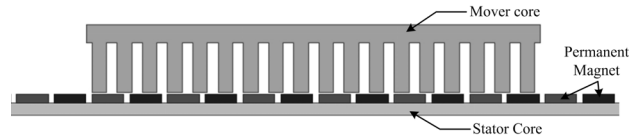
2.1 지배방정식과 자속밀도 특성

고정자에 위치한 영구자석의 자화 분포는 Fourier급수를 통해 식 (1)-(2)로 표현 할 수 있다.

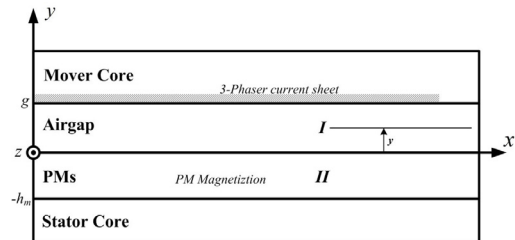
$$\vec{M} = \sum_{n=odd}^{\infty} M_{yn} e^{jk_n x} \vec{i}_y \quad (1)$$

$$M_{yn} = \frac{1}{2\tau} \int_0^{2\tau} M_0 e^{-jk_n x} dx \quad (2)$$

여기서, $k_n = \frac{n\pi}{\tau}$ 이며, τ_m, τ, n 은 각각 자석너비, 극 피치, 고조파의 차수 이다.



〈그림 1〉 철심형 리니어 모터 해석 모델



〈그림 2〉 자기 해석을 위한 직각좌표계 해석 모델

〈표 1〉 리니어 모터 사양

적층길이	35 [mm]	Mover 길이[mm]	216 [mm]
극 간격[mm]	18 [mm]	슬롯 간격(τ_s)	12 [mm]
자석 너비[mm]	15 [mm]	슬롯 너비	7 [mm]
자석 두께	4 [mm]	슬롯 오프닝(z_0)	5 [mm]
공극[mm]	0.8 [mm]		

2.2 치 슬롯 구조를 고려한 자기 분포 특성 해석

그림 2는 영구자석을 갖는 철심형 리니어모터의 자기특성해석을 수행 위한 단순화된 직각좌표계 모델이다. 각 영역에서의 자기 분포 특성은 자기벡터 포텐셜 A_n 과 맥스웰 방정식을 기초로 하는 지배방정식을 통해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \mathbf{B} &= \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A}_n \end{aligned} \quad (3)$$

자기벡터 포텐셜 A_n 은 x 방향으로 k_n 에 따른 분포 특성을 갖고 있으며, 크기는 y 방향으로 시간 t 에 대하여 변화율을 갖는 함수이다. 이를 수학적으로 나타내면 식(4)와 같다.

$$\mathbf{A}_n = \text{Real} \left\{ A_{zn}(y) e^{-jk_n x} \right\} \vec{i}_z \quad (4)$$

자기벡터 포텐셜로 표현되는 일반해는 식(5)과 같다.

$$\begin{aligned} A_{zn} &= A_{zh} + A_{zp} \\ &= \left\{ C_n \cosh(k_n y) + D_n \sinh(k_n y) - \frac{j\mu_0 M_{yn}}{k_n} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

공극(I)과 영구자석(II) 영역에서의 자기벡터 포텐셜은 식 (6)과 같고, 식(3)를 통해 각 영역의 x, y 방향의 자속 밀도를 구하며 식 (7)과 같다.

$$A^I(y) = \{C_n^I \cosh(k_n y) + D_n^I \sinh(k_n y)\} \quad (6)$$

$$A^{II}(y) = \left\{ C_n^{II} \cosh(k_n y) + D_n^{II} \sinh(k_n y) - \frac{j\mu_0 M_{yn}}{k_n} \right\}$$

각 영역의 경계에서의 자속밀도 조건을 통해 $C_n^I, D_n^I, C_n^{II}, D_n^{II}$ 를 구하여 식(7) 대입 하면, 각 영역에서의 자속 밀도를 구할 수 있다.

$$B_x^I(y) = k_n \{C_n^I \sinh(k_n y) + D_n^I \cosh(k_n y)\} e^{-jk_n x}$$

$$B_y^I(y) = jk_n \{C_n^I \cosh(k_n y) + D_n^I \sinh(k_n y)\} e^{-jk_n x}$$

$$B_x^{II}(y) = k_n \{C_n^{II} \sinh(k_n y) + D_n^{II} \cosh(k_n y)\} e^{-jk_n x} \quad (7)$$

$$B_y^{II}(y) = jk_n \left\{ C_n^{II} \cosh(k_n y) + D_n^{II} \sinh(k_n y) - \frac{j\mu_0 M_{yn}}{k_n} \right\} e^{-jk_n x}$$

여기서, 계수 $C_n^I, D_n^I, C_n^{II}, D_n^{II}$ 는 식(8)와 같다.

$$C_n^I = \frac{-j\mu_0 M_{yn}}{k_n} \left\{ \frac{\coth(k_n g_c)}{\coth(k_n g_c) - \coth(-k_n h_m)} \right\}$$

$$C_n^{II} = \frac{-j\mu_0 M_{yn}}{k_n} \left\{ \frac{\coth(-k_n h_m)}{\coth(k_n g_c) - \coth(-k_n h_m)} \right\}$$

$$D_n^I = D_n^{II} = \frac{j\mu_0 M_{yn}}{k_n} \left\{ \frac{1}{\coth(k_n g_c) - \coth(-k_n h_m)} \right\} \quad (8)$$

2.2 이동자 철심의 형상 모델링

자계에서 슬롯 형상에 의한 영향은 크게 2가지가 있다. 첫 번째는 각 극에 대한 전체적인 자속의 감소이며 이것은 카터계수 K_c 로 계산되어진다. 두 번째는 공극과 영구자석 사이의 자속밀도 분포에 대한 영향이다. 치 슬롯 형상을 고려하기 위하여 하나의 치 슬롯 모델에 대하여 2-D 비퍼미언스 함수를 구하고, 이 함수를 여러 슬롯으로 확장한다. 공극과 영구자석 사이의 퍼미언스 계산은 영구자석을 제거하고 고정자와 가동자 사이의 자기 벡터 포텐셜 변화를 계산하여 구할 수 있으며 2-D 퍼미언스 함수를 Fourier급수로 표현하면 식 (9)과 같다.

$$\tilde{\eta}(x, y) = \eta_{dc} + \sum_{k=1,2,3,\dots}^{\infty} \eta_{ac} \cdot \cos\left(\frac{2k\pi}{\tau_t} x\right) \quad (9)$$

여기서 각 DC, AC 성분인 η_{dc}, η_{ac} 은 식(10), (11)와 같다.

$$\eta_{dc} = \frac{1}{K_c} \left(1 - 1.6\beta_0 \frac{z_0}{\tau_t} \right) \quad (10)$$

$$\eta_{ac} = -\beta(y) \frac{4}{\pi k} \left[\frac{1}{2} + \frac{\left(k \frac{z_0}{\tau_t} \right)^2}{\frac{1}{2 \cdot (0.8)^2} - 2 \left(k \frac{z_0}{\tau_t} \right)^2} \right] \cdot \sin\left(1.6\pi k \frac{z_0}{\tau_t} \right) \quad (11)$$

식(9)의 슬롯 형상이 고려된 2-D 비퍼미언스 함수를 위에서 구한 자속 밀도에 곱하여 슬롯 형상이 고려된 자속 밀도를 구할 수 있다.

2.3 디텐트력 및 흡인력

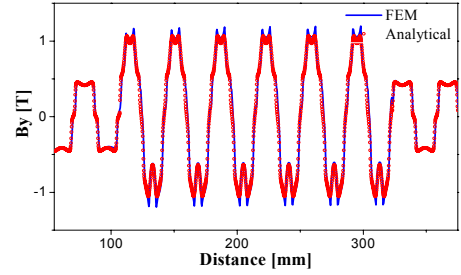
디텐트력은 가동자가 이동할 때 영구자석과 가동자의 치 슬롯 구조에 의해 발생하는 자기 에너지 변화량이므로 에너지법을 이용하여 식(12)과 표현이 가능하며 영구자석과 철심의 자화 에너지는 공극 에너지에 비해 무시할 만큼 작으므로 식(13)와 같이 표현 할 수 있다.

$$F_d(z) = -\frac{\partial W(z)}{\partial z} = -\frac{\partial W(z)_{airgap}}{\partial z} \quad (12)$$

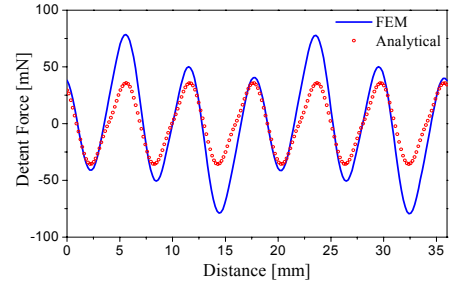
$$W(z) \approx W(z)_{airgap} = \frac{1}{2\mu_0} \int_v [B_{slotted} - I]^2 dv \quad [J] \quad (13)$$

흡인력은 공극의 에너지에 의해 발생한 힘으로 에너지와 힘의 단위 변환 식에서 유도하여 식(14)과 같이 구할 수 있다.

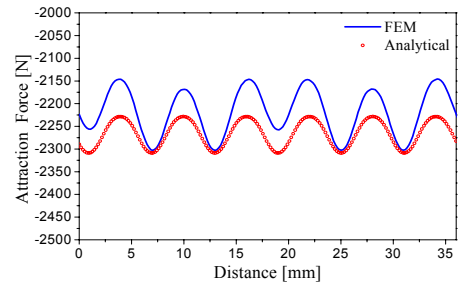
$$F_{normal} = \frac{W(z)_{airgap}}{air-gap} \quad [N] \quad (14)$$



〈그림 3〉 한 위치에서의 y성분 공극자속 밀도



〈그림 4〉 디텐트력



〈그림 5〉 흡인력

3. 해석결과 및 오차

공간고조파해석법을 통해 얻은 결과와 FEM 결과 비교 시, 상당히 비슷한 패턴의 유형과 크기를 나타내고 있다. 공극에서의 y축 방향 자속 밀도의 경우 기본적인 자속 모델에 슬롯팅 효과가 나타나고 있다. 디텐트력과 흡인력의 경우 전반적으로 비슷한 패턴이나, 리니어 모터의 단부 효과를 고려하지 못 한 점에서 FEM과는 다소 다른 결과를 가져왔다. FEM에서는 극 슬롯 조합에 따른 또 다른 고조파가 포함되어 있고, 누설자속에 의해 크기에도 오차가 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 선형운동 공작기계의 정밀가공오차 원인의 하나인 리니어 모터의 힘 특성, 즉, 디텐트력, 흡인력을 해석적 방법에 의하여 예측하였다. 해석결과는 디텐트력 pk-to-pk 오차 0.0864[N], 흡인력 평균 오차 35.7[N] 1.6%로 상대적으로 높은 정밀도를 갖는 것을 알 수 있다. 제시된 해석결과를 통해 본 논문의 해석적 모델은 이송 테이블에 적용되는 리니어모터의 힘특성 영향을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 향후, 정밀도 예측 및 통합시뮬레이터 DB에서 가공오차 예측을 위한 S/W로 적절히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 지식경제부 국가플랫폼기술개발사업으로 수행되는 직선운동 유니트 정밀도 예측 및 통합 시뮬레이터 개발사업[10033595]의 일환으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] 박철훈, 최상규, 함상용, 백선희, 오정석, “자기부상을 이용한 리니어 모터의 코깅포스 및 모멘트 측정장치의 설계,” 한국정밀공학회 2010년도 춘계기술대회 논문집, 1019-1020, 2010