

## 브러시 없는 직류 선형 모터의 추력 계산 방법의 비교

최문석<sup>0</sup>, 김용일

(한국과학기술연구원, 영상미디어연구센터)

### The Comparison of thrust computational methods of a brushless DC linear motor

Moon-Suk Choi, and Yong-Yil Kim

(KIST, Imaging media research center)

#### Abstract

For a given brushless DC linear motor, we suggest the numerical prediction methods to analyze it's thrust characteristics. First, we calculate the magnetic flux density by the finite element method, and we then compute the maximum thrust with three computational methods - a Lorentz equation, a Maxwell stress method and a virtual work method. To confirm the accuracy of the computational methods, we measure the thrust of the linear motor made by our laboratory with a force-torque sensor. Also, we calculate the thrust by the measured back electromotive force. To choose the appropriate method for a specified application, we compare the maximum thrusts of the computational method and the calculation by the back electromotive force with the measured one. We conclude that the Maxwell stress method is turned out the best because it has the most accurate results among three computational methods and it is more convenient than the calculation method by the back electromotive force.

#### 1. 서론

브러시 없는 직류 선형 모터의 성능 평가를 위하여 수치적인 방법과 실험적인 방법을 통하여 추력 특성을 분석하였다. 실험결과에 대하여 각 수치결과를 비교하고, 수치적인 방법의 정확도와 효율을 나타내었다.

선형 모터는 선형으로 배치된 코일과 자석의 전기적 흡인력과 반발력을 구동원으로 하여 직선 추력을 얻는 직접구동모터이다. 특히 본 연구에서 제작된 브러시 없는 직류 선형 모터는 철심이 없으며, 영구자석을 이용한 것으로 빠른 속도와 균일하고 강한 추력, 정확한 위치제어가 가능하기 때문에, 이러한 성능이 요구되는 CD-player, 반도체장비 등의 분야에 적용이 증가하고 있는 추세이다. 따라서 최근 이러한 형태의 선형 모터 및 다양한 형태의 선형 모터에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.

Idir등[1]은 선형 모터 중에서 코일에 흐르는 전류에 의하여 형성되는 유도 자력을 이용하여 유도 모터를

제작하였다. 그리고 고정자의 포화자속밀도를 고려하여 이에 대한 모델링 및 해석을 수행하였고, 실험적인 결과와 수치해석결과를 비교하여 정확도를 검증하였다. Mizuno등[2]은 코일의 전류에 의한 유도 자력과 영구자석을 이용한 선형 동기 모터를 제작하고, 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 정확도를 검증하였다. 서로 접한 영구자석 사이에 빈 공간을 배치하여 자속밀도흐름을 유연하게 변화하도록 하여 성능을 향상하였다. 그 결과, 자석 한 주기에 대하여 자석의 폭이 0.73일 때 가장 좋다는 결과를 얻었다. 한편 추력과 수직력을 계산하고 영구자석에 의한 수직력이 이동자가 받는 추력에 비해 6.4배정도 큼을 구하였다.

Basak등[3]은 영구자석을 서로 마주보게 일렬로 배치하고 영구자석사이에 코일을 배치한 구조의 선형 모터를 설계하였다. 이 경우 양측에 위치한 영구자석이 발생하는 장력을 견딜 수 있도록 U자형 스프링장치를 고안하여 고정자를 지지하도록 제작하였다. 이 모델에 대하여 5가지 추력을 계산하는 방법을 제안하였다. 그러나 고정자 제질의 자기적인 성질을 나타내는 히스테리시스선도를 선형으로 가정하였기 때문에 과도한 자속밀도가 흐르는 것으로 평가하였다.

Seiki등[4]은 높은 정밀도와 큰 가속도의 특징을 가지는 선형 모터를 제작하였다. 영구자석, U자형 고정자와 3상 코일을 이용하였고, 이의 추력특성을 분석하였다.

지금까지의 선형 모터에 관한 연구는 구동원리와 이를 이용한 다양한 종류의 선형 모터 방식의 개발과 제작에 집중되어 왔다. 따라서 모터의 성능을 평가할 수 있는 최도인 추력에 대한 다양한 평가방법에 대한 연구가 필요하다.

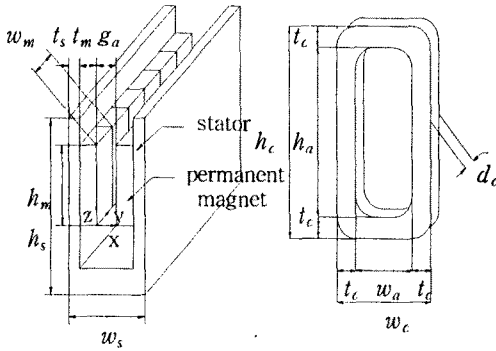
#### 2. 수치해석

##### 2.1 해석모델

그림 1에 본 연구의 해석모델인 브러시 없는 선형 모터에 사용되는 영구자석을 부착한 고정자 및 이동자용 코일의 형상을 나타내었다. 그림 1(a)는 고정자에 마주보는 자석의 극이 서로 다르게, 그리고 이웃한 자석의 극도 서로 다르게 배치하였다. 고정자는 마주보

는 자석의 장력을 견디기 위하여 U자형으로 설계하였고, 재질로는 기계적인 강도를 유지하기 위하여 탄소강을 사용하였다. 자석은 공극자속밀도를 증가시키기 위하여 잔류자속밀도가 큰 소결자석(Nd-Fe-B)을 사용하였다. 선형 모터의 이동자에 부착하는 코일은 그림 1(b)와 같은 형상으로 제작하였으며, 코일 3개를 3상으로 연결하여, 선형 모터에 이동자로써 부착하였다. 코일에 순간 최대 전류인 6A의 전류가 이동자의 위치에 따라 흐르도록 하였다. 여기서 각 명칭은 다음과 같다.

- $w_m$  : 자석폭,  $h_m$  : 자석높이,  $t_m$  : 자석두께,
- $t_s$  : 고정자두께,  $h_s$  : 고정자높이,  $w_s$  : 고정자폭
- $g_a$  : 공극,  $h_c$  : 코일높이,  $t_c$  : 코일두께
- $w_c$  : 코일의 폭,  $d_c$  : 코일깊이,
- $h_a$  : 코일 중심의 높이,  $w_a$  : 코일 중심의 폭



(a) A stator with permanent magnets (b) A coil component used for the mover

Fig. 1 Schematic diagram of a stator and a coil composing a brushless DC linear motor

## 2.2 추력 특성 분석법

추력 특성 분석은 다음과 같은 세가지의 수치적인 방법과 두가지의 실험적인 방법으로 분석한다. 수치적인 방법으로는 대략적인 추력을 구하기 위한 산술적인 계산법인 Lorentz 추력계산과 보다 정확한 해석값을 얻기 위하여 유한요소법을 이용한 Maxwell 응력법과 가상일(virtual work)을 이용한 방법을 택하였다.

모터가 단순한 구조를 가지고 따라서 자석과 코일사이의 공극자속밀도가 균일하다고 가정할 수 있는 경우에 다음과 같이 Lorentz 추력계산을 이용하여 추력을 계산할 수 있다.

$$F = n \cdot z \cdot B \cdot l \cdot I \quad (1)$$

여기서,  $z$ 은 코일의 단면 수이고,  $n$ 는 코일 단면의 코일의 턴 수이고,  $B$ 는 자력밀도이고,  $l$ 은 코일의 유효길이며,  $I$ 는 코일의 최대전류이다.

위치에 따른 자속밀도의 변화와 코일에 흐르는 전류에 의하여 쇄교되는 자속밀도를 고려하기 위해서는 해석영역을 미소체적으로 나누어서 계산하여야 한다. 식(2)는 미소체적에서 Maxwell 응력계산식이다. 여기서  $J$ 는 전류밀도이고,  $T$ 는 Maxwell 응력(stress tensor) 또는 자기적 응력(magnetic stress tensor)이며,  $\mu$ 는 투자율이다. 유한요소법을 이용하여 미소체적들의 응력 합을 구하여 추력을 계산한다.

$$F = \int_v J \times B dV = \frac{1}{\mu} \int_v \text{div} T dV = \frac{1}{\mu} \int_s T dS \quad (2)$$

또한, 유한요소법과 식(3)을 이용하여 각 미소체적에 대하여 가상일을 구할 수 있다. 이 가상일으로써 각 미소체적에 작용하는 힘을 계산할 수 있고, 이를 이용하여 이동자의 전체 추력을 구할 수 있다.

$$dW = F dL = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} s dL \quad (3)$$

실험적인 방법으로는 이동자의 추력을 직접 측정하는 방법과 코일에 형성되는 역기전력(back emf)을 측정하여 추력을 계산하는 방법을 택하였다. 이동자의 추력을 직접 측정하는 경우에는 힘-토크 측정기를 이용하여 y축 방향으로의 최대추력을 측정한다. 역기전력은 두 개의 이동자를 이용하여, 한 개의 이동자가 등속도로 다른 이동자를 이동시키며 측정한다. 이동되는 이동자에서 얻어지는 역기전력을 측정하여, 이동되는 이동자의 추력을 계산한다.

## 2.3 수치해석

ANSYS의 electromagnetic field analysis를 사용하여 Maxwell 응력과 가상일(virtual work)을 계산하기 위한 수치해석을 수행하였다. 이를 위하여 그림 2와 같이 해석모델을 2차원으로 모델링하였다. 그동안의 연구결과에 따라서 U자형 고정자와 외부공기로의 3차원적인 y 방향으로 자속밀도의 흐름은 매우 적기 때문에 무시한다.[5] 공기와 접하고 있는 양끝에 위치한 자석과 중심부에 위치한 자석을 모두 모델링하기 위하여 4개의 자석을 해석모델로 하였고, 주위의 공기를 포함하였다. 주위의 공기는 무한경계조건으로 설정하였다.

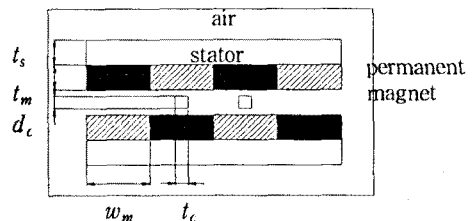


Fig. 2 The 2-D analysis model for the brushless DC Linear motor

1) ANSYS® is a registered trademark of SAS IP Inc.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 추력 측정 및 계산

다양한 방법으로 추력을 계산하고 각 방법의 효율을 비교하기 위하여 실험을 이용하여 직접 정확한 추력을 측정하였다. 측정된 선형 모터의 최대 추력은 62.2N이고, 이를 다음의 방법들의 결과에 대한 기준값으로 선정하였다.

이동하는 이동자의 속도가 1%일 때, 두 개의 이동자를 이용하여 측정된 최대 역기전력은 9.5V이고, 이를 이용하여 추력을 계산하면 65.0N이다. 이는 직접 측정된 추력인 기준값과 4.5%의 오차를 가진다.

Lorentz 추력을 계산하기 위해서는 영구자석과 코일 사이 공극에서의 자속밀도 분포를 먼저 구하여야 한다. 공극자속밀도는 영구자석에 의한 것과 코일에 의하여 형성되는 것이 있다. 그러나 영구자석에 의한 자속밀도에 비하여 코일에 의하여 형성되는 자속밀도는 매우 작기 때문에 이를 무시하였다. 코일이 없는 고정자에 대하여 자속밀도를 위치에 따라 측정된 값과 유한 요소법으로 해석한 결과를 그림 3에 도시하였다. 영구자석에 의한 자속밀도는 사다리꼴 분포를 가지므로, 공극자속밀도를 7880G로서 일정하다고 하였다. 이를 이용하여 Lorentz 추력을 계산하면, 68.5N이고, 실험값과 비교하여 10.1%의 오차를 가진다.

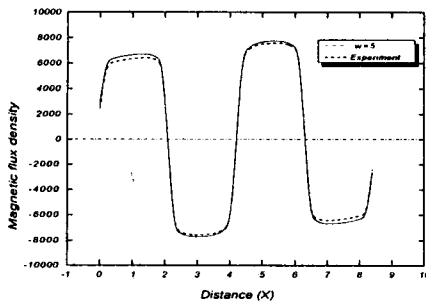


Fig. 3 The variation of the magnetic flux density according to the distance for x-direction in air gap

영구자석에 의한 자속밀도가 자석의 위치에 따라서 변화하는 것과 코일에 의한 자속밀도와 영구자석에 의한 자속밀도의 중첩효과를 고려하기 위하여 유한요소법을 이용한 수치해석을 수행하였다. 이 결과를 이용하여 Maxwell 응력과 가상일에 의한 추력을 계산하였다. 그 결과는 각각 66.4N과 68.3N이고, 기준값과 비교하여 6.8%와 9.7%의 오차를 가진다. 수치모델을 2차원으로 모델링하였기 때문에 y방향으로의 자속밀도 차이를 고려하지 못하였고, 1개의 코일을 모델링하여 3상의 코일의 추력을 추정하였기 때문에 오차가 발생하였다. 그러나 산술적인 계산에 비하여서는 3.3%오차가 줄어들었다.

#### 3.2 수치적인 방법의 고찰

역기전력을 이용한 계산의 경우에는 직접 추력을 측정하는 실험에 비하여 측정이 용이하지만, 두 개의 이동자가 필요하기 때문에 선형 모터에 적용이 어렵고, 실제 모델을 제작하여 측정하여야 하기 때문에 평가에는 적합하지만, 설계에는 적합하지 않다.

Lorentz 추력 계산법은 본 해석모델과 같이 코어가 없고, 영구자석을 이용한 직류 선형 모터의 경우에 적용이 매우 쉽고 대략적인 계산이 가능하지만 오차가 컸고, 코일의 중심에 코어가 존재하면 코일에 의한 쇄교 자속밀도를 무시할 수 없기 때문에 적용 범위가 한정되어 있다.

유한요소법을 이용하여 추력을 계산하면, 실제 모델을 제작하지 않고도, 다양한 형태의 모터를 모델링할 수 있고, 비교적 적은 오차(6.8%) 범위내에서 설계할 수 있으며, 평가에도 쉽게 적용할 수 있다. 그리고 Maxwell 응력법을 이용한 계산 결과가 가상일을 이용한 계산 결과에 비하여 정확했다.

### 4. 결론

브러시 없는 선형 모터를 제작하고 특성을 평가하기 위하여 다섯가지 방법으로 추력을 측정하였다. 각 방법마다 장단점이 있었지만, 직접 추력을 측정하기 어려운 경우에는 역기전력 측정을 이용하는 것이 가장 빠르고, 쉽게, 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 이의 적용은 한계가 있으므로, 설계 및 성능 평가에 모두 적용이 가능하며 비교적 오차가 적은 유한요소법과 Maxwell 응력법을 이용한 계산이 가장 좋은 방법이다.

#### 참고문헌

1. K. Idir, G. E. Dawson and A. R. Eastham, "Modeling and performance of linear induction motor with saturable primary", Conf. IEEE Ind., Vol. 1, pp. 150~154, 1991.
2. T. Mizuno and H. Yamada, "Magnetic circuit analysis of linear synchronous motor with permanent magnets", IEEE Trans. Magn., Vol. 28, pp. 3027~3029, 1992.
3. A. Basak, A. Matsumura, J. Kaczmarek and G. Lloyd, "Computation of flux and force in an SmCo5 dc linear motor with U-spring supports", J. Magn. Magn. Mater., pp. 583~586, 1994.
4. T. Seiki, O. Kouchi, U. Teruo, S. Osamu, A. Hirokazu, and T. Massaki, "Development of high acceleration linear motor with precise positioning accuracy", Trans. IEE Japan, Vol. 113-A, No.7, pp.535~539, 1993.
5. 최문석, 김용일, 이상락, "브러시 없는 직류 선형 모터의 고정자 형상 최적설계", 정밀공학회 추계학술대회, 1997.