

브러시없는 직류 선형 모터의 고정자 형상 최적 설계

The optimum geometric design of stators for brushless DC linear motors

최문식, 김용일, 이상락 (한국과학기술연구원)

Moon-Suk Choi, Yong-Yil Kim and Sang-Lak Lee (KIST)

Abstract

We design and analyze two type stators for brushless DC linear motors by the experiment and the computational analysis. For a U-shape stator, the maximum magnetic flux density by the finite element method(FEM) is larger than that by the experiment by 1.0~2.2%. The result by the FEM is so accurate that it can be applied to the geometric design for the optimization. To increase the maximum magnetic flux density, we suggest an improved stator and analyze it by the 3-D and 2-D models. The maximum magnetic flux density of the improved stator is larger than that of the U-Shape stator by 2.7%. Considering the size of the improved stator and the maximum magnetic flux density, we determine that the optimized thickness is 5mm for a given specification.

Key Words : brushless linear motor(브러시없는 선형 모터), FEM(유한요소법),
a U-shape stator(U자형 고정자), an improved stator(개선된 고정자)

1. 서론

최적화된 형상의 고정자를 갖는 브러시없는 직류 선형모터를 설계 제작하고, 실험을 통하여 자속밀도를 측정한 후 유한요소법을 이용하여 수치적 방법으로 해석하였다. 해석결과로 부터, 선형모터의 성능을 향상시키고 크기를 최소화하기 위하여 가장 큰 영향을 미치는 고정자의 형상과 치수를 최적화한다.

선형모터는 직선 운동을 직접 얻을 수 있으므로 회전모터의 회전 운동을 직선 운동으로 바꾸어 주는 기어나 벨트, 혹은 볼 스크류 등 기구가 필요 없다. 선형모터는 코일과 자석의 전기적 흡인력과 반발력을 구동원으로 하여 직선 추력을 얻는 직접구동모터이다. 또한 위치 및 속도제어기구로써 빠른 속도와 강한 추력, 정확한 위치제어가 가능하기 때문에, 이러한 성능이 요구되는 공장자동화, CD-player, 반도체장비 등의 분야에 적용이 증가하고 있는 추세이다. 따라서 최근 선형모터에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.

Mizuno 등⁽¹⁾과 Akmese 등⁽²⁾은 코일의 전류에 의한 유도 자력과 영구자석을 이용한 선형동기모터를 제작하고, 실험과 수치해석결과를 비교하여 정확도를 검증하였다. Mizuno 등⁽¹⁾은 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 영구자석에 의한 수직력은 이

동자가 받는 추력에 비해 6.4배정도로 나타났다.

Basak 등⁽³⁾은 2개의 철심과 7개의 영구자석을 이용한 선형모터를 제작하였다. 이 선형 모터는 에너지가 매우 큰 영구자석의 자력을 이용함으로써 보다 큰 추력을 얻을 수 있었으나 안정된 추력을 얻지는 못하였다. 또한 Basak 등⁽⁴⁾은 영구자석을 서로 마주보게 일렬로 배치하고 영구자석사이에 코일을 배치한 구조의 선형모터를 설계하였다. 이 경우 양측에 위치한 영구자석이 발생하는 장력을 견딜 수 있도록 U자형 스프링 장치를 고안하여 고정자를 지지하도록 제작하였다. 그러나 고정자 재질의 자기적인 성질을 나타내는 히스테리시스선도를 선형으로 가정하였기 때문에 과도한 자속밀도가 흐르는 것으로 평가되었다.

Seiki 등⁽⁵⁾은 높은 정밀도와 큰 가속도의 특징을 가지는 선형모터를 제작하였다. 영구자석, U자형 고정자와 3상 코일을 이용하였고, 이의 추력특성을 분석하였다.

지금까지의 선형모터에 관한 연구는 구동원리와 이를 이용한 다양한 종류의 선형모터 방식의 개발에 집중되어 왔으며 또한 제작된 모터의 평가도 주로 실험적인 방법과 기본적인 수치적인 방법에 의존하였다. 따라서 수치해석결과를 이용한 모터 형상의 설계는 많이 이루어지지 못하였다.

2. 해석모델

그림 1에 본 연구의 해석모델인 브러시없는 선형 모터의 고정자를 나타내었다. 마주보는 자석의 극이 서로 다르게, 그리고 이웃한 자석의 극도 서로 다르게 배치하였다. 고정자는 마주보는 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. 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

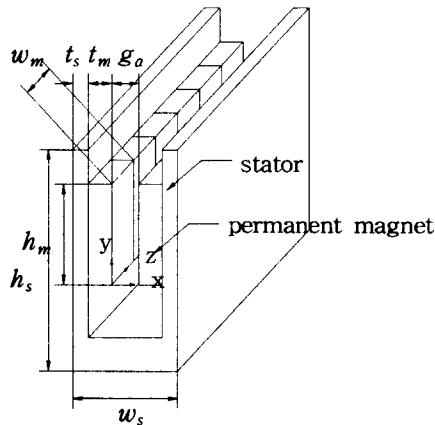
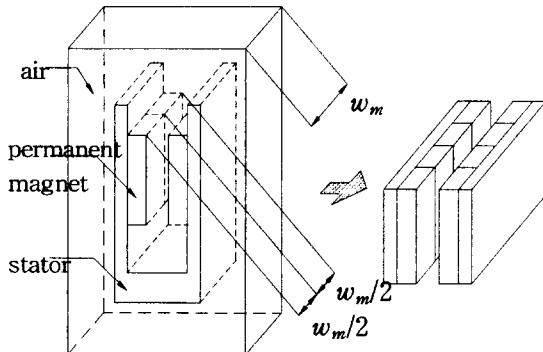


Fig. 1 Schematic diagram of a stator and permanent magnets composing a brushless DC linear motor

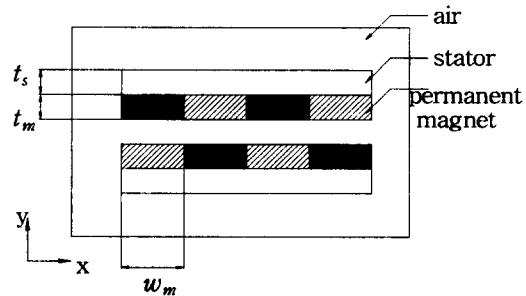
3. 수치해석

수치해석은 ANSYS[®]의 electromagnetic field analysis를 사용하여 해석하였다. 이를 위하여 그림 2와 같이 해석모델을 3차원 및 2차원으로 모델링하였다. 그림 2(a)는 컴퓨터의 기억 용량과 계산시간을 고려하여, 일렬로 배열된 자석들 중에서 중심부에 위치한 자석을 가정하여 모델링한 것이다. 서로 다른 극을 갖는 이웃한 자석의 반씩($w_m/2$)을 모델링하고 경계면을 자석의 중심에 위치시켜 대칭경계조건으로 설정하였다. 또한 고정자의 포화에 따른 외부자기누설을 고려하기 위하여 주위의 공기를 해석영역에 포함하였다. 공기의 경계는 무한경계조건으로 설정하였다. Seiki⁽⁵⁾은 그림 2(a)의 자석에서 발생한 자속밀도는 자석의 뒤쪽 고정자를 통하여 이웃한 자석으로 전달되거나, 뒤쪽과 아래쪽 고정자를 통하여 마

주보는 자석으로 전달될 수 있다고 하였다.. 3차원 모델링을 이용하여, 고정자를 통하여 마주보는 자석에 전달되는 자속밀도의 경로를 구하였다. 그림 2(b)는 수치해석 결과를 이용하여 만든 향상된 형태의 고정자의 형상이다. 향상된 고정자는 구조가 간단해졌으므로 그림 2(c)와 같이 2차원으로 모델링하였다. 2차원 모델링은 계산시간과 기억용량의 제한이 적으므로, 공기와 접하고 있는 양 끝에 위치한 자석과 중심부에 위치한 자석을 모두 모델링하기 위하여 4개의 자석을 해석모델로 하였고, 주위의 공기를 포함하였다.



(a) The 3-D analysis model (b) an improved stator for a U-shape stator



(c) The 2-D analysis model for an improved stator
Fig. 2 The 3-D and the 2-D analysis models for a U-shape and an improved stators

4. 결과 및 고찰

4.1 3차원 및 2차원 모델 비교

3차원 모델링을 통한 z방향 단면의 자속밀도 분포도를 그림 3에 나타내었다. 자석의 경계에서 주위로 갈수록 약한 자속밀도를 가지며, 각 부분은 0~25000(G)의 값을 가진다. 고정자 밑부분의 자속밀도는 주위 공기와 같이 200G이하의 값을 가진다. 이는

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

수치해석시에 예상한 옆방향과 아래 방향의 흐름 중에서 고정자의 밑부분을 통하여 마주보는 자석에 전달되는 자속밀도가 거의 없음을 나타낸다. 따라서 자속밀도는 자석 뒷면에 접하고 있는 고정자를 통하여 옆쪽에 위치한 자석으로 전달된다. 즉 자석에서 고정자 아래부분으로 전달된 자속밀도는 고정자의 자화에 소모되고 자석으로 전달되지 못한다.

이런 자속밀도의 흐름을 수치적으로 살펴보기 위하여, 그림 4에 자석의 표면에서 y방향 위치에 따른 각 방향성분 자속밀도의 변화를 도시하였다.

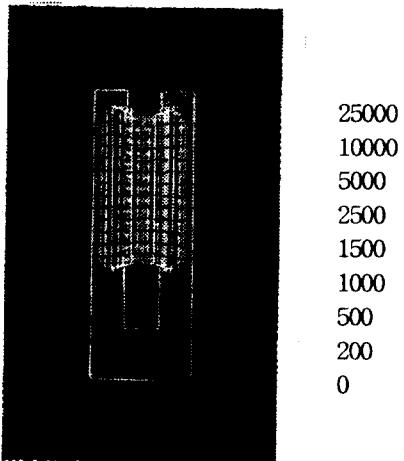


Fig. 3 The magnetic flux density for a cross section($z=0$) of a 3-D analysis model

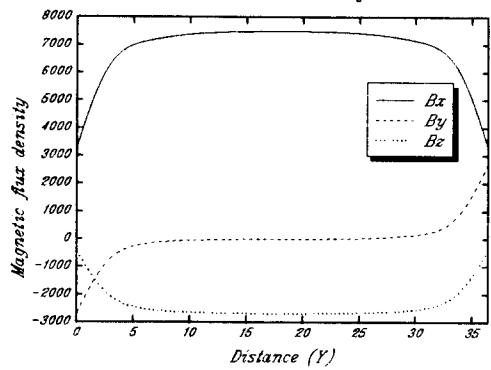


Fig. 4 The variation of the magnetic flux density for x,y,z direction in a symmetric line($z=0$)

이동자(코일)에 전달되는 자속밀도를 나타내는 x방향으로의 자속밀도 흐름은 자석의 중심부에서 가장 크고 아래쪽과 위쪽에서 작게 나타났다. 따라서 위쪽과 아래쪽에서 공기중으로 자속밀도의 손실이 생기는 것을 알 수 있다. 이러한 손실량을 구하기 위하여 y방향의 자속밀도 흐름을 보면, 약 3000G정도의 손실이 있음을 알 수 있다. 또한 z방향의 자속

밀도 흐름을 보면 중심부에서 자속의 흐름이 더 활발함을 알 수 있는데 이는 y축에 따르는 손실이 없는 중심부에서 옆쪽에 접한 자석으로 자속밀도가 전달됨을 의미하며, 마주보는 자석으로 전달되지 못한다는 것을 알 수 있는데 이러한 량 또한 이동자에 전달되지 못하므로 손실이다. 따라서 y, z방향으로의 자속밀도 흐름을 줄여야 한다.

따라서, 고정자의 크기를 최소화하고 공극자속밀도를 최대로 하기 위해서는 자석뒤쪽에 위치한 고정자를 제외하고 고정자의 다른 부분에 모두 자속밀도가 흐르지 않도록 해야한다. 이를 위하여 그림 2(b)와 같은 향상된 고정자의 형태를 제안하였다. 이 해석모델은 y축으로 무한길이를 가진다는 가정하에 그림 2(c)와 같이 2차원 모델링이 가능하다. Table 1은 U자형 고정자와 향상된 고정자에 대하여 각각, 실험과 3차원 모델링, 그리고 3차원 모델링과 2차원 모델링의 결과 및 오차를 비교한 것이다. U자형 고정자인 경우에 실험결과에 대하여 수치적 결과의 오차는 2.2% 이내로 매우 잘 일치하고 있고, 따라서 수치해석(FEM)을 이용한 고정자의 평가와 설계가 타당함을 알 수 있다. U자형 고정자에 비하여 향상된 고정자의 경우에, 같은 3차원 모델을 통한 수치적 결과를 비교하면, 2.7%의 공극자속밀도 향상을 얻을 수 있었다. 이는 고정자의 자화에 따른 손실을 줄였기 때문이다. 향상된 모델의 경우에 2차원 모델링의 결과는 3차원 모델링에 비하여 3.9%의 오차를 가진다. 이는 그림 4에서 나타난 y축으로의 손실을 고려하지 않았기 때문에 x방향의 자속밀도가 y방향으로 일정하다고 가정하였기 때문이다. 계산시간 및 격자수를 비교하면, Indy를 사용하였을 때 3차원 모델링의 경우에 3600분정도, 2차원 모델링의 경우 약 20분정도가 걸리며 25000개, 7000개가 소요된다. 그러므로 계산시간과 기억용량을 고려할 때, 2차원 모델링이 적합함을 알 수 있다.

Table 1 Results of a U-shape and an improved stators by the experiment, the 3-D and 2-D analysis

a U-shape stator		
method	result	error
experiment	7170~7224	
3-D analysis	7240	1.0~2.2%
an improved stator		
method	result	error
3-D analysis	7440	2.7%*
2-D analysis	7730	3.9%

* : compared with the 3-D analysis result for a U-shape stator

4.2 고정자의 형상 최적화

비교적 정확한 결과를 얻을 수 있고, 계산시간이 적게 소요되는 2차원 모델링을 이용하여 고정자의 크기 최적화를 수행하였다. 향상된 고정자의 형상 중에 높이는 자석의 높이와 같으므로 두께(t_u)의 최적화가 필요하다. 해석모델에서 맨 우측과 좌측의 자석은 선단효과(end effects)가 있으므로 가운데 자석에서 나오는 자속밀도를 비교하고자 한다. 그림 5는 고정자의 두께 변화에 따른 자속밀도의 변화를 나타낸 것이다.

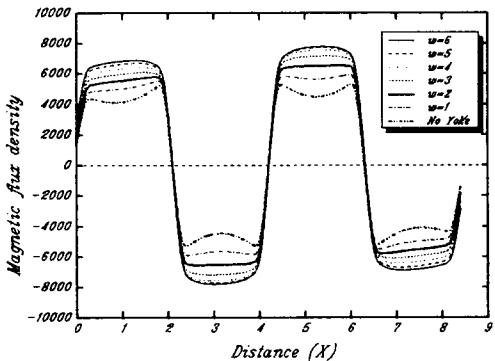


Fig. 5 The variation of the magnetic flux density for y-direction according to a distance for x-direction in air gap

고정자는 재질은 탄소강으로서 투자율이 낮으나 포화 자속밀도가 큰 특징을 가진다. 이에 따라 고정자의 폭이 좁은 경우에 자속밀도가 빨리 전달되지 못해서 집중되기는 쉽지만, 많이 집중되어도 쉽게 포화되지 않는다. 가운데 두 쌍의 자석에서 발생되는 자속밀도를 비교하면 고정자를 부착하지 않고 공기중에 위치한 경우에는 4454G의 자속밀도가 영구자석의 중심부에서 발생되고, 최대 자속밀도은 5539G로서 자석의 끝부분에서 발생된다. 고정자의 두께가 증가하면 최대 자속밀도도 증가하지만, 5mm 이상이 되면 더 이상 최대 자속밀도가 증가하지 않는다. 이 값은 자석의 폭이 5mm인 경우에 약 7730G 정도, 6mm일 때 약 7880G정도로 1.9%의 차이를 보일 뿐으로 거의 수렴하였다. 이를 고정자를 부착하지 않은 경우의 결과와 비교하면 중심부에서 73~75%의 자속밀도 향상을 얻었다. 따라서 탄소강의 경우에 고정자의 크기에 대하여 최대 자속밀도를 얻을 수 있는 최적화된 고정자의 폭은 5mm이다.

최대 자속밀도가 발생하는 위치를 살펴보면 고정자의 두께가 얇을수록 영구자석의 끝부분에서 발생하고 두께가 증가하면 중심부에서 발생한다. 이는 고정자의 두께가 증가하여 공기중으로의 손실이 없

어지면 중심부에서 최대자속밀도가 발생된다. 그러나, 고정자의 두께가 감소하여 공기중으로 손실이 발생하면 영구자석의 중심부에서는 손실이 이루어지지만, 양쪽 끝에서는 좌우에 위치한 바로 옆 자석으로 자속밀도가 전달되므로 고정자를 통하여 이동하는 거리가 짧기 때문에 손실이 거의 없어서 고정자 두께에 따른 영향이 매우 적음을 알 수 있다.

5. 결론

최적화된 형상의 고정자를 갖는 브러시없는 직류 선형모터를 설계 제작하고, 유한요소법을 이용하여 해석한 결과로부터 고정자의 형상과 치수를 최적화 하였다. U자형 고정자와 향상된 고정자의 자속밀도 특성을 실험적, 수치적으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) U자형 고정자의 경우에 실험결과와 비교하여 1.0~2.2%의 오차를 가지는 수치적 결과를 구하였고, 따라서 수치적인 방법이 타당함을 알 수 있다.
- (2) U자형 고정자의 자속밀도 흐름을 구하고, 향상된 고정자의 형상을 제안하였고, 공극자속밀도를 2.7% 향상하였다.
- (3) 향상된 고정자의 경우, 2차원 모델링을 하여 3 차원 모델링에 비하여 오차가 5.9% 발생하였고, 계산시간은 180배 단축하였다.
- (4) 탄소강 고정자의 크기에 대하여 최대 자속밀도를 얻을 수 있는 최적화된 두께는 5mm이다.

참고문헌

1. T. Mizuno and H. Yamada, "Magnetic circuit analysis of linear synchronous motor with permanent magnets", IEEE Trans. Magn., Vol. 28, pp. 3027~3029, 1992.
2. R. Akmeze and J. F. Eastham, "Design of permanent Magnet flat linear motors for Stanstill Applications", IEEE Trans. Magn., Vol. 28, pp. 3042~3044, 1992.
3. A. Basak, A. F. Flores Filho, "The design and analysis of a novel brushless dc linear motor", J. Magn. Magn. Mater., pp. 640~643, 1994.
4. 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.
5. 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.