

영구 자석의 Skew 형태에 따른 선형 동기기의 특성에 관한 3D 유한 요소 해석

황인철, 이동엽, 김규탁
 창원대학교 전기 공학과

The 3D Finite Element Analysis of PMLSM according to Skew shape of Permanent Magnet

In-Cheol Hwang, Dong-Yeup Lee, Gyu-Tak Kim
 Dept. of Electrical Engineering Changwon National University

Abstract - 본 논문에서는 영구자석의 스큐형상에 따른 영구자석형 선형 동기기(PMLSM: Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)의 제반 특성을 해석하였다. 단방향 Skew의 경우 스큐 방향과 직각 방향으로 작용하는 Lateral Force가 존재한다. 이러한 Lateral Force는 가동자와 LM 가이드 사이에 마찰력으로 작용하여 PMLSM의 제반 특성을 저하시킨다. Lateral Force의 저감을 위하여 영구자석을 V형상으로 모델링하여 단방향 착자 시의 특성과 비교하였다. V-skew 모델의 lateral force가 단방향 skew 모델의 lateral force의 11.3[%]로 감소하는 양호한 결과를 얻었다.

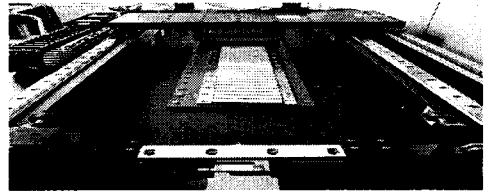


그림 1 기본 모델
 Fig.1 Basic model

표1. 기본 모델의 사양

	Item	Value (unit)
Stator (PM)	자속 밀도	1.32 (T)
	영구자석의 높이	9.0 (mm)
	영구자석의 길이	95 (mm)
	영구자석의 두께	26.5 (mm)
	Pole pitch	30(mm)
	백 아이언 두께	10(mm)
Mover (Primary)	턴수	304
	코일높이	16.95 (mm)
	코일내폭	14.0 (mm)
	코일변 폭	13.0(mm)
	코일의 폭	40.0 (mm)
	Slot pitch	40 (mm)
	치의 길이	93(mm)
	skew 길이	10(mm)
공극 전류		6.53 (A)
공극 길이		1.4 (mm)
정격 추력		647.6[N]

1. 서 론

선형동기전동기는 기본적으로 회전형 영구 자석형 동전동기와 구조 및 구동원리가 동일하나 상대적으로 큰 공극을 가지며, 길이가 유한하다는 점이 다른 점이다. 즉, 가동자의 이동 변위가 제한될 뿐만 아니라 회전기에서는 존재치 않는 수직력 및 단부효과, 이동자의 지지구조 등을 설계 시 추가적으로 고려하여야 한다[1]. 특히, 영구자석형 회전기에서의 코깅토크(cogging torque)와 같이 영구자석과 슬롯의 상대적인 위치 변화에 따른 디텐트력(detent force)이 존재하며, 이는 전동기 구동 시 추력의 맥동으로 작용하여 기기의 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라 기기의 제어성능을 저하시킨다. 그러므로 정밀 제어를 필요로 하는 장비에 장착되는 PMLSM의 경우, 영구자석을 비롯한 구조 변화에 따른 특성 고찰이 필요하며 전동기의 설계 시 제어에 악영향을 미치는 여러 요인들을 분석하여 그 영향을 최소화하는 설계 기술이 요구된다[2,3].

디텐트력을 저감 시키는 방안은 많이 발표되었다. 이러한 방법 중 영구자석 또는 철심에 스큐를 시행하여 디텐트력을 저감시키는 방법이 가장 일반적이다. 그러나 영구자석 스큐 시 영구자석의 스큐방향과 직각방향으로 작용하는 Lateral force가 발생하여 LM 가이드에 브레이킹력으로 작용하여 PMLSM의 제반 특성이 저하된다. 그러나 이와 같은 현상들은 2차원 FEA로는 해석이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 3차원 FEA 프로그램을 이용하여 영구자석의 스큐가 PMLSM에 미치는 영향을 해석하였으며 이를 개선시키기 위한 마그네트 형상을 제시하였다.

2. 기본 시험기

2.1 기본 모델(단방향 skew) 특성

그림 1에는 기본 모델을 나타내었고, 그림 2에는 기본 모델의 요소 분할도와 자속 분포도를 나타낸 것이다. 요소의 수는 35만개 내외이며, 에너지 밀도가 높은 공극를 세밀하게 요소분할 하였다. FEA 해석 결과의 에너지 오차는 0.5 % 이내에서 수렴하도록 하였다. 표 1은 기본 모델의 사양을 나타낸 것이다.

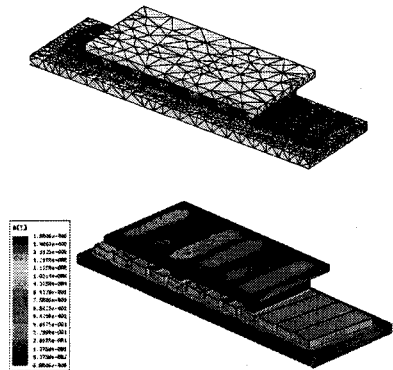


그림 2. 요소 분할도와 자속 분포도

2.2 시험기 구성 및 실험

리니어 모터의 발생 추력은 로드셀을 이용하여 측정한다. 이때 이동자를 로드셀로 고정시킨 후 발생하는 힘을 측정하므로 정지시의 추력만 측정하게 된다. 따라서, 로드셀의 위치를 조금씩 이동시키면서 발생 추력을 측정하여 정추력을 실측하게 되므로 엄밀한 의미에서의 이동자의 추력이라고 말할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 PMLSM의 Stator를 슬라이딩베드 위에 고정시켰다. 이때 슬라이딩 베드는 LM 가이드 위에 장착되어 있어 마찰력을 최소화 시키는 물론 이동이 가능하도록 하였다. 이 슬라이딩 베드를 로드셀로 고정시키므로써 PMLSM의 mover가 이동시에도 작용, 반작용 법칙을 이용 PMLSM의 stator에 가해지는 moving 추력을 실측할 수 있도록 하였다. 정추력은 로드셀(model: SBR-200L, CAS)를 사용하여 측정하였다. 측정 방법은 가동자를 고정시키고 코일에 3상 전원을 인가하였을 때 로드셀에서 출력되는 전압과형을 힘으로 환산하였다. 디텐트력은 로드셀(model: SB-20L, CAS)를 사용하여 측정하였으며, 가동자의 변위를 일정간격으로 이동시키면서 힘의 변화를 측정하였다. 가동자의 변위 측정은 리니어 스케일을 이용하여 측정 오차를 최소화하였다. 한편, mover의 속도는 리니어 스케일 1.0[m]로 실측하였다. 또한 동특성 측정 시스템에 별도의 양측식 리니어 모터를 설치하여 부하로서 사용하도록 하였으며 이를 이용 역기전력 상수도 측정할 수 있도록 하였다.

2.3 기본 모델 특성

그림 3은 기본 모델의 디텐트력을 나타낸 것이다. 2D 해석에서의 디텐트력 피크치는 28.75[N]이며, 3D에서의 디텐트력 피크치는 23.169[N]이며 실험치의 디텐트력 피크치는 19.6[N]으로 나타났으며 3D 해석치에 리플이 다소 크게 나타났으며 이는 해석 모델을 좀 더 정교하게 나뉘면 이와 같은 오차는 크게 감소하리라 사료된다.

그림 4 (a)는 3차원 유한요소법으로 해석한 추력 특성이며, 이때의 인가 전류는 6.53[A]이다. 이 때, 추력의 피크치는 685.46[N]이다. 그림 4(b)는 실험치이다. 가동자에 6.53[A]를 인가한 경우 추력은 629.65[N]으로 나타났다. 그림 5는 고조파 분석을 나타냈었으며, 왜형률은 8.48[%]이다.

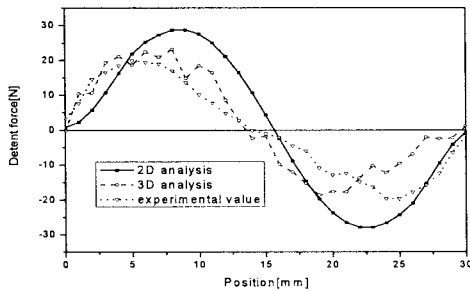
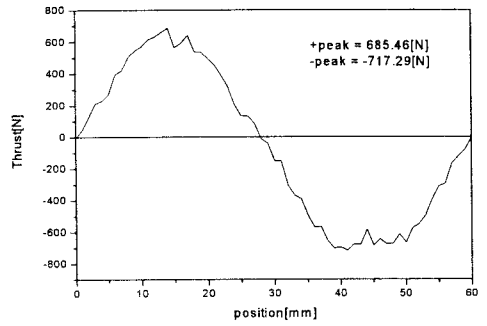
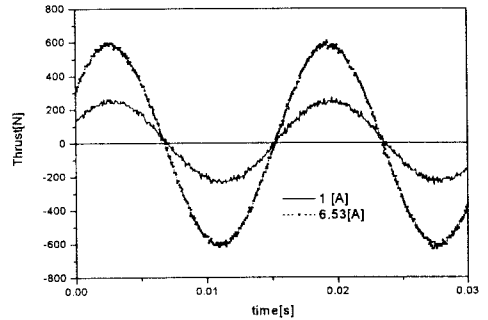


그림 3. 디텐트력

영구자석에 스큐를 적용한 경우 가동자는 스큐 방향에 직각 방향으로 작용하는 lateral force가 작용한다. 그림 6은 가동자의 위치에 따라서 Z-축으로 작용하는 lateral force의 변화를 나타낸 것이다. Z-축 방향으로 작용하는 힘의 피크치는 46.687[N]으로 이 힘은 lateral force로 작용하여 가동자와 LM 가이드 사이에 마찰력으로 작용하며 PMLSM에 악영향을 미친다. 그림 7은 가동자를 1[m/s]로 움직일 때 한 상에 발생하는 역기전력을 나타낸 것이다. 발생전압의 피크치는 46.5[V]로 실측되었다. 따라서, 역기전력 상수는 32.9[V · s/m]로 실측되었으며 이론치 34.4[V · s/m]와 일치하는 만족스러운 결과를 얻었다.



(a) FEM 해석 결과



(b) 실험치
그림 4. 정추력

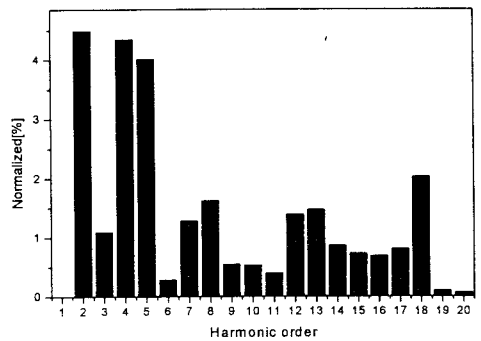


그림 5. 고조파 분석

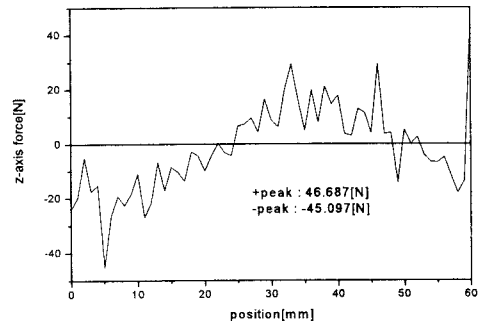


그림 6. Z-축으로 작용하는 힘

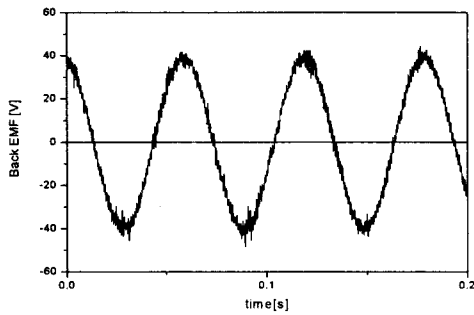


그림 7. 역기전력

2.4. Lateral force 최소화 모델(V-skew)

그림 8 은 영구 자석이 V 형 스킴을 가지는 모델이다. 스킴 길이는 단방향 skew와 같이 10[mm]이며, 영구 자석의 단면적도 동일하다. 단방향 skew의 경우 영구 자석의 스킴방향과 직각으로 작용하는 Lateral force가 발생하여 PMLSM의 제반 특성을 저하시킨다. 따라서 이를 보완하기 위하여 영구자석의 형태를 V자 형상으로 함으로서 가동자에 Z-축으로 작용되는 힘을 평형하게 만들어 lateral force가 발생하지 않도록 하였다.

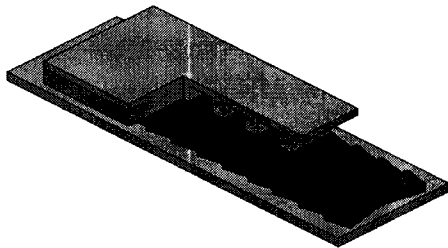


그림 8 V-skew 모델

2.4.1 V-skew 모델의 특성

그림 9는 V-skew 모델의 추력을 나타낸 것이다. 추력의 피크치는 648.95[N]으로 단방향 스킴 형상보다 5.33[%] 감소하지만 영구자석의 overhang 길이 조절 및 V자 형태의 자석 사이의 간격 등을 조정하면 단방향 착자와 동일한 추력을 발생시키리라 사료된다. 또한, 스킴 효과가 크게 나타나 발생 출력의 왜형률은 6.3[%]로 단방향 스킴에 비하여 2.18[%]가 감소하였다.

한편, PMLSM의 제반 특성을 저하시키는 lateral force는 V 스킴인 경우 5.3[N]으로 계산되었다. 이는 단방향 착자의 피크치 46.7[N]의 11.3[%]에 불과하다. 이는, V 스킴인 경우 이론적으로는 lateral force가 0이어야 하나 계산 오차로 lateral force가 나타났다.

3. 결 론

본 논문에서는 스킴의 형태에 따른 PMLSM의 특성을 고찰하였다. 차-슬롯 구조를 갖는 리니어 모터의 경우 디텐트력 저감을 위하여 스킴을 적용하게 되며 스킴 적용 시에는 기기의 제반 특성을 저하시키는 lateral force가 발생한다. 이를 해결하는 방법의 하나로서 V자 모양의 영구자석 착자를 제안하였으며, 해석 결과 추력은 V-skew 모델이 단방향-skew 모델에 비하여 5.33[%] 감소하였지만, V-skew 모델의 추력 감소분은 영구자석에 오버행을 적용함으로써 보상할 수 있으리라 사료된다.

V skew 를 적용함으로써 lateral force의 영향을 대폭 줄일 수 있었다. 단방향 스킴시 Z-축 방향 힘은 46.687[N]이며, V skew의 Z-축 방향 힘은 5.3207[N]으로 단방향 스킴시의 11.3[%]로 감소하는 양호한 결과를 얻었다.

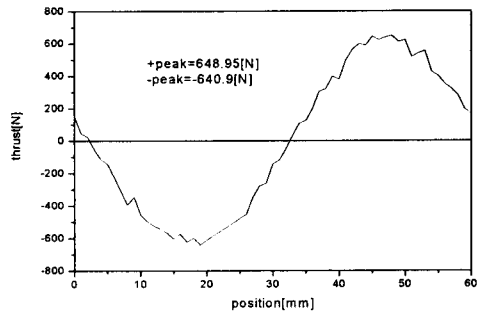


그림 9. V-skew 모델의 추력

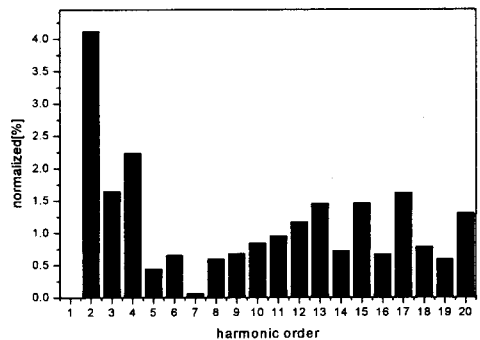


그림 10. 고조파 분석

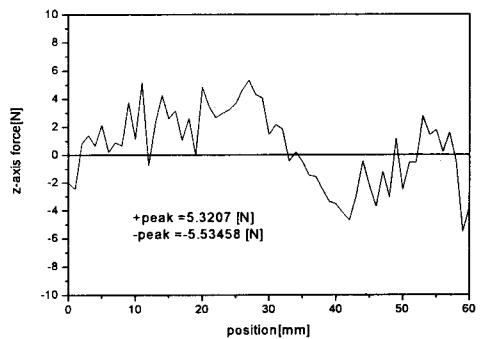


그림 11. Z-축으로 작용하는 힘

[참 고 문 헌]

- [1] 천장성, “급가속용 선형동기전동기의 특성해석 및 최적설계”, 서울대학교 박사학위논문, 1999.
- [2] 임기채, 우준근, 김규탁, 홍정표, “영구자석 선형동기전동기의 디텐트력 저감법”, 대한전기학회 논문지, 2000.
- [3] 장석명, 윤인기, 이성호, 이종호, “영구자석형 선형동기전동기의 디텐트력 저감방식에 관한 특성해석 및 상호비교”, 2000년 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp.757~759, 2000.