

PMLSM의 영구자석 배열방법에 따른 진동저감 특성 연구

이승훈, 황인철, 정수권, 장기봉, 김규탁

창원대학교 전기공학과

A study on the vibration reduction characteristics of PMLSM according to permanent magnet array

Lee Seung-Hoon*, Hwang In-Cheol, Jeong Su-Kwon, Jang Ki-Bomg, Kim Gyu-Tak

Department of Electrical Engineering, Changwon National Univ.

Abstract - This paper presents the vibration reduction of PMLSM according to permanent magnet array. The detent force and the lateral force are generating the thrust ripple that cause vibration in PMLSM. The detent force, the thrust and the lateral force is analyzed by 3D FEM. And the acceleration sensor is used for experimentation of vibration.

1. 서 론

직선 추력을 요구하는 분야에서 모터의 높은 효율과 제어성능을 요구한다. 리니어 모터의 추력의 리플은 기기의 진동과 소음으로 작용하며, 기기의 제어 특성을 저하시키므로 최소화가 필수적이며, 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 추력 리플의 원인으로는 치-슬롯 구조에 의한 공극에서의 자기 저항의 차와 단부 효과에 의해 발생하는 디텐트력, 가동자 권선에 의한 기자력과 고정자 영구자석에 의한 기자력의 교차하면서 발생하는 리플 등이 있다. 추력 리플을 최소화시키는 방법으로는 영구자석 또는 철심에 skew를 시행하는 방법, 보조 치 또는 보조 구조로 철심을 형상변화 등이 있으며, 본 논문에서는 공극에서의 자기 저항차로 발생하는 디텐트력을 최소화하기 위해 영구 자석에 skew를 시행하였다. skew를 시행하면 디텐트력이 감소하여 추력의 왜형률이 개선되며, 진동과 소음이 감소하게 되는 장점을 갖는다. 반면에 추력이 감소하며 코일의 엔드 턴에 쇄교하는 자속이 비대칭이 되어 리니어 모터의 운전 방향에 직각 방향으로 작용하는 lateral force도 발생하여 마찰력으로 작용한다. Lateral force에 의한 마찰력은 디텐트력과 마찬가지로 리니어 모터의 운전시 진동과 소음을 발생시키기 때문에 최소화시켜야 한다. 추력의 감소분을 보상하기 위해 영구자석에 오버행(overhang)을 시행한 skew 모델을 설계하였으며, 비대칭 구조를 원천적으로 제거하기 위하여 V-skew 모델을 설계하였고, 3차원 유한요소 해석을 통해 각 모델의 디텐트력, lateral force 및 추력을 계산하였다. 그리고 디텐트력, 추력 및 진동 실험을 통하여 영구자석 배열에 따른 진동특성을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

표1은 해석 모델인 영구자석형 선형동기기(PMLSM)의 사양을 나타내었다.

그림 1은 기본 모델, skew 모델, V-skew 모델의 사진이다. 기본 모델은 skew와 오버행이 시행되지 않은 모델이며, skew 모델은 기본 모델에서 발생하는 디텐트력을 최소화시키기 위하여 극간격의 1/3만큼 skew를 시행하였으며, 추력의 감소분을 보상하기 위하여 영구 자석에 4mm의 오버행을 시행한 모델이다. 그림 1 (c)의

V-skew 모델은 skew 모델과 오버행 길이는 4mm로 동일하며, skew에 의해 발생하는 lateral force의 영향을 알아보고, 그 힘을 최소화시키기 위하여 본 논문에서 제시한 개선 모델이다.

표 1 해석 모델의 사양

	Item	Symbol	Value
Stator (PM)	영구자석 폭	w_{PM}	26.5mm
	영구자석 길이	l_{PM}	93mm
	극 간격	p	30mm
	잔류자속 밀도	Br	1.37T
Mover (Primary)	치 폭	w_t	14mm
	치 높이	h_t	17mm
	치 길이	l_t	95mm
	슬롯 간격	s	40mm
	슬롯 폭	w_s	13mm
	턴 수		304
	공극		1.4mm
정격 전류			6.53A



그림 1 해석 모델

2.2 유한요소 해석법을 이용한 해석

그림 2는 PMLSM에서 발생하는 힘을 도식적으로 표현하였다. PMLSM에는 디텐트력, 추력, 수직력, lateral force 등의 힘이 발생한다. 일반적으로 디텐트력, lateral force는 PMLSM의 전반적인 특성에 악영향을 끼친다.

디텐트력은 영구 자석과 치의 인력에 의하여 주기적으로 발생하며, 전원이 인가되지 않은 상태에서도 발생하게 된다. 따라서 디텐트력은 추력의 맥동으로 작용하여 기기 운전 시 소음과 진동으로 작용하며, 위치 정밀도를 저하시키게 된다.

lateral force는 영구 자석에 skew를 시행하는 경우, 엔드 턴에 쇄교하는 자속이 비대칭을 이루면서 y축 방향의 양의 방향 또는 음의 방향으로 작용하는 힘이다. 이는 리니어 가이드와 가동자 사이에 마찰력으로 작용하며, 리니어 가이드의 구조상 수평 방향으로 작용하는 마찰력에 대해서는 크게 작용하게 되어 추력의 손실 및 진

동 및 소음의 원인이 된다.

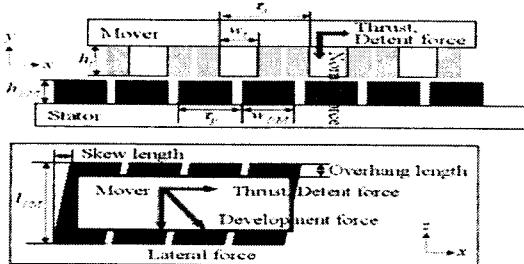


그림2 PMLSM에서의 발생력

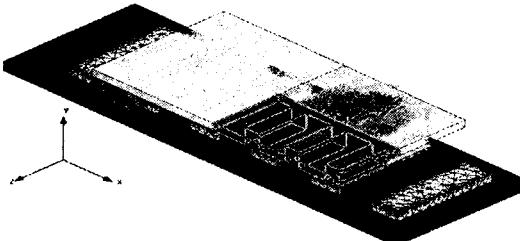


그림3 해석 모델의 요소 분할, 자속 벡터, 자속 밀도 분포

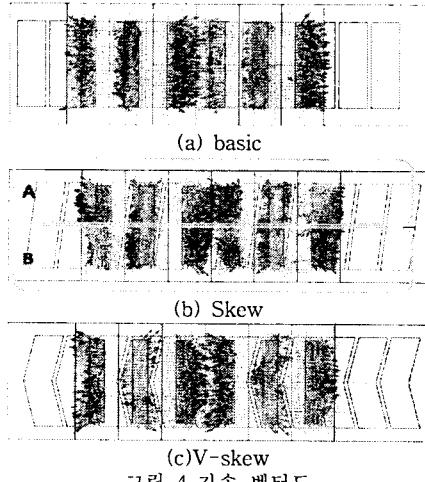


그림 4 자속 벡터도

일반적으로 2D 유한 요소해석으로는 skew, 오버행(overhang) 효과 등 전기기기의 축 방향 깊이로의 해석이 불가능하다. skew의 경우, 슬라이스 기법을 이용하여 skew 효과를 알아 볼 수 있지만, 슬라이스 개수에 따라 값의 오차가 발생하며, 엄연한 의미에서의 스큐 효과라고 단정 짓기 곤란하다. 또한 오버행(overhang)과 y축 방향으로 작용하는 힘에 대해서는 고려할 수가 없다. 즉, 2차원 유한 요소 해석에서는 영구자석과 철심의 깊이가 동일하다고 가정하기 때문에 오버행(overhang)에 의한 영향을 고려하기 어렵고, 엔드 턴의 영향을 고려할 수 없기 때문에 y축 방향으로 작용하는 lateral force도 구할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 3차원 유한 요소 해석을 사용하여 해석하였으며, 그림 3은 3차원 유한 요소 해석 결과를 나타낸 것으로, 요소 분할도와 자속 벡터도, 자속 밀도 분포 등을 확인할 수 있다.

그림 4(a)는 basic 모델, 그림 4(b)는 skew 모델(b), 그림 4(c)는 V-skew 모델의 자속 벡터도를 나타내었다.

그림에서 보듯이 No-skew 모델과 V-skew 모델의 경우 y축 방향에 대해서 대칭적인 자속 분포를 보이는 반면, skew 모델의 경우 y축 방향에 대해서 A 부분이 B 부분의 자속 밀도가 비대칭임을 알 수 있다. 이러한 비대칭적인 힘의 분포가 y축 방향으로 뒤틀리는 힘을 작용하게 함으로써 lateral force 가 발생하게 된다.

2.3 특성 비교 및 검토

그림 5는 선형 전동기의 디텐트력 및 추력을 측정하기 위한 장비이다. 디텐트력의 측정은 로드셀(제조사: CAS, 모델명: SB-20L)을 Sliding Bed에 고정시킨다. 이때 고정자가 설치되어 있는 슬라이딩 베드는 양 쪽에 리니어 가이드가 설치되어 있어 자유롭게 움직일 수 있다. 따라서 가동자의 변위를 이동시키면 작용-반작용 법칙에 의해 고정자에 가해지는 디텐트력이 로드셀에 의하여 측정된다. 이때 가동자의 변위는 리니어 스케일을 이용하여 측정하였으며, 리니어 스케일의 오차 범위는 1 마이크로 미터이다. 추력의 측정은 로드셀을 Sliding Bed에 고정시키고, 가동자 또한 고정시켜 3상 전원을 인가하면 가동자에 이동 자제가 발생하게 되므로 부하각에 따른 추력이 발생하게 된다. 가동자는 고정되어 있으므로 부하각에 따른 추력은 디텐트력과 마찬가지로 작용-반작용 법칙에 의해 로드셀에 전달된다.

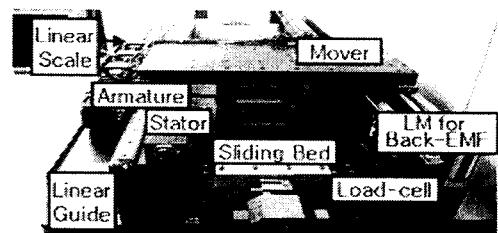


그림 5 디텐트력 및 추력 측정 장비



그림 6 가속도센서 장착

그림 6은 진동실험을 하기위하여 PMLSM에 가속도 센서를 장착한 사진이다. 본 연구에서는 추력 리플에 의한 진동을 측정하기 위하여 PMLSM의 운전방향과 동일한 방향인 x축 방향으로 센서를 장착하여 진동을 측정하였고, lateral force에 의한 진동을 측정하기 위하여 운전 방향에 수직인 y축 방향에 센서를 장착하여 진동을 측정하였다.

그림 7은 스큐(skew) 형태에 따른 디텐트력의 실험치와 FEM 결과이다. 기본모델의 경우 68.3[N]으로 디텐트력의 영향이 가장 크며, skew 모델과 V-skew 모델의 경우 각각 23.3[N]과 25.3[N]으로 skew를 적용하지 않은 기본 모델에 비하여 디텐트력이 34.1[%], 37.0[%]로 감소하였다. 또한 skew 모델과 V-skew 모델의 디텐트력 실험치는 19.2[N], 26.4[N]으로 해석치와 대동소이한 값을 얻었다.

그림 8은 전류에 따른 추력 실험치를 나타낸 것이다. FEM 해석 결과에서는 기본모델의 경우의 추력의 피크치가 900.0[N]이고 skew 모델과 V-skew 모델의 경우 899.1[N], 902.9[N]으로 대동소이한 값을 가졌다. 그러나

실험 결과에서는 skew 모델이 다른 두 모델에 비하여 추력 값이 30.9N 감소하였음을 알 수 있다. 이렇게 감소한 원인은 skew 모델에 lateral force가 발생했기 때문이다. 또한 전류가 낮은 경우의 추력 차이는 작은 반면 전류가 증가할수록 추력차이가 많이 나는 것은 lateral force가 전류에 비례하여 증가하기 때문이다. 따라서 lateral force에 의한 마찰 손실이 커짐에 따라 추력 감소량도 커졌기 때문이다.

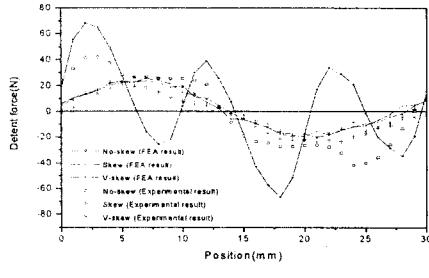


그림 7 디텐트력

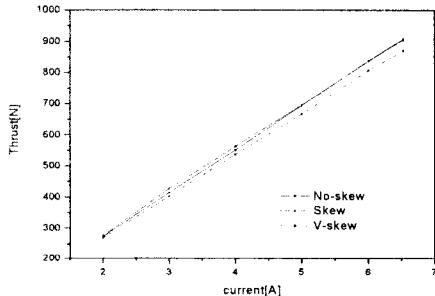


그림 8 추력

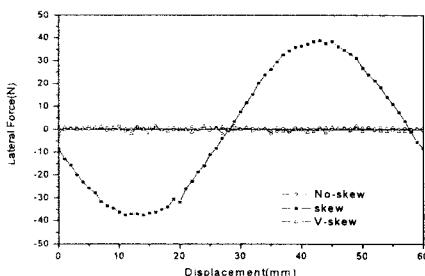


그림 9 Lateral force

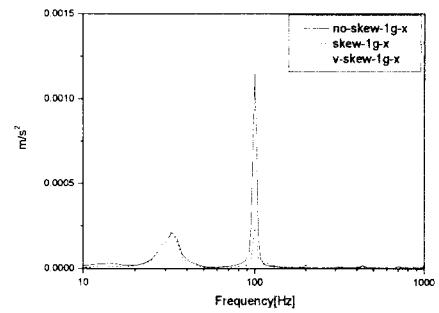
그림 9는 3가지 모델의 lateral force를 비교한 것이다. 기본 모델과 V-skew 모델은 각각 1.5N 2.1N이며, skew 모델의 경우 38.8N의 값을 갖는다. 따라서 V-skew 모델이 skew에 의한 lateral force를 근본적으로 해결할 수 있음을 알 수 있다.

그림 10(a)는 x축 방향으로 발생하는 진동 실험 결과이다. PMLSM이 1[G]의 가속도로 1[m/s]로 운전할 때 100[Hz] 대역에서 발생하는 진동은 기본모델 $11.5 \times 10^{-4} [\text{m/s}^2]$, skew 모델 $2.35 \times 10^{-4} [\text{m/s}^2]$, V-skew 모델 $1.91 \times 10^{-4} [\text{m/s}^2]$ 로 측정되었다.

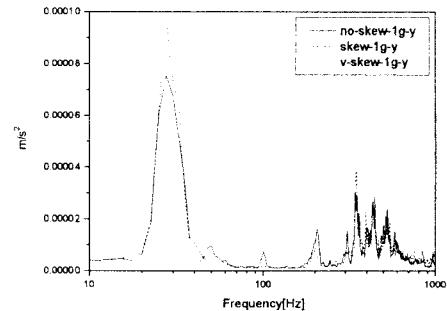
100[Hz]대역에서 발생하는 진동은 기본모델에 비하여 skew 모델은 79.56[%], V-skew 모델은 83.39[%]가 감소되었다. 이를 통해 디텐트력에 의하여 x축 방향으로 발생하는 추력리플이 감소됨에 따라 x축 방향으로 발생되는 진동이 감소되는 것을 알 수 있다.

그림 10(b)는 y축 방향으로 발생하는 진동 실험 결과이

다. skew 모델의 경우 27.5[Hz] 대역에서 $9.68 \times 10^{-5} [\text{m/s}^2]$, 기본 모델 $7.54 \times 10^{-5} [\text{m/s}^2]$, v-skew 모델 $6.8 \times 10^{-5} [\text{m/s}^2]$ 로 측정되었다. 27.5[Hz]대역에서 발생하는 진동은 skew모델에 비하여 기본 모델은 22.10[%], V-skew 모델은 29.75[%]의 감소되었다. 따라서 skew모델에서 lateral force에 의하여 y축으로 더 많은 진동이 발생하고, 이는 V-skew를 시행함으로써 감소시킬 수 있다.



(a) x축 진동



(b) y축 진동

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석의 배열방법에 따른 진동저감 특성에 대하여 고찰하였다. 기본 모델, skew모델 그리고 V-skew모델에 대하여 3D FEM 해석을 통해 디텐트력과 주력, lateral force를 계산하였고, 실험을 통해 디텐트력, 추력 및 진동을 측정하였다. 기본 모델에 V-skew를 시행하여 디텐트력에 의하여 x축 방향으로 발생하는 진동을 83.39[%] 저감 시킬 수 있었고, lateral force에 의하여 y축 방향으로 발생하는 진동을 29.75[%] 저감 시킬 수 있었다. 이로써 본 논문에서 제시한 V-skew모델이 디텐트력 및 lateral force에 의한 진동을 저감시키는 것을 입증할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 김규탁 외, "BLDC Motor의 비대칭 오버행 효과에 의한 소음 및 진동 특성", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집 pp109~111, 2006
- [2] Ki-Chae Lim, Joon-Keun Woo, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu Tak Kim, "Detent force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 1157~1160, 2002