

PMLSM의 lateral force 최소화를 위한 V-skew 모델의 특성 해석

황인철, 이승훈, 윤병채, 장기봉, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

Characteristics analysis of V-skew model for minimization of lateral force in PMLSM

Hwang In-Cheol, Lee Seong Hoon, Yun Byung-Chae, Jang Ki-Bong, Kim Gyu-Tak
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Univ.

Abstract - By enforcing skew of permanent magnet, detent force decreases, but lateral force that acts for vertical direction of moving direction occurs. This force deteriorates various performance of PMLSM as that acts to friction force between mover and LM guide. Therefore, in this paper, V skew model is proposed for lateral force's reduction and simulation results are compared to experimental value.

1. 서 론

PMLSM(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor: 영구 자석형 선형동기기)는 영구 자석의 사용과 전기자의 치-슬롯 구조에 의해 필연적으로 디텐트력이 발생하며, 이러한 디텐트력은 추력의 맥동으로 작용하여 PMLSM의 제어 특성을 저하시키며, 진동과 소음의 직접적인 원인이 된다. PMLSM의 디텐트력을 저감하기 위한 연구가 많이 이뤄져 왔으며, 디텐트력 기법중 가장 쉽게 적용한 것이 영구자석이나 철심에 skew를 시행하는 것이었다. skew를 시행하는 경우 디텐트력이 감소하여 추력 특성이 정현파에 가깝게 크게 개선되나, 발생 추력의 크기가 다소 감소하고, 영구자석에 의한 자속과 전기자에 의해 발생하는 자속이 skew 각 만큼 기울어지기 때문에 Z-축방향에 대해 비대칭적인 힘이 발생하게 된다. 이러한 비대칭 구조에 의하여 Z-축방향으로 작용하는 lateral force가 발생하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 비대칭 구조를 개선하여 lateral force의 영향을 최소로 만들기 위하여 V-skew 모델을 제안하였으며, 3D FEA 결과와 실험치를 비교하였다.

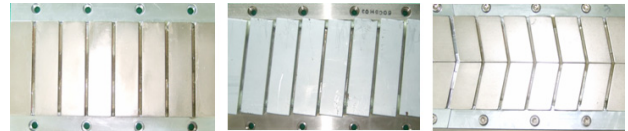
2. 본 론

2.1 해석 모델

표1은 해석 모델의 사양을 나타내었다. 그림 1은 No-skew, skew, V-skew 모델을 도식화한 것이다.

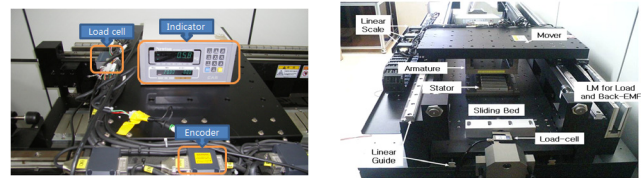
<표 1> 해석 모델의 사양

Item	Symbol	Value	
Stator (PM)	Width of PM	w_{PM}	26.5mm
	Length of PM	No-skew	93mm
		Skew, V-skew	95mm
	Pole pitch	τ_p	30mm
	Skew length	No-skew	0mm
Skew, V-skew		10mm	
Residual magnetic flux density	B_r	1.32T	
Mover (Primary)	Width of teeth	w_t	14mm
	Height of teeth	h_t	16.95mm
	Length of teeth	l_t	95mm
	Slot pitch	τ_s	40mm
	Width of slot	w_s	13mm
Turns		304	
Mechanical air-gap		1.4mm	
Rated current		6.53A	



<그림 1> 해석 모델

2.2 특성 측정 시스템을 이용한 실험



<그림 2> 실험 장비

2.2.1 디텐트력 측정

디텐트력은 리니어 스케일과 엔코더를 이용하여 가동자를 일정 간격(1mm)으로 이동시키면서 로드셀(CAS: SB-20L)을 사용하여 측정하였다.

2.2.2 정추력의 측정

계자를 로드셀로 고정된 상태에서 전기자에 3상 전원을 인가하면 3상전류에 의해 이동자계가 발생시킨다. 영구자석은 고정되어 있으므로 부하각이 변하게 되며, 부하각 변화에 따른 발생 추력이 슬라이딩 베드와 연결된 로드셀에 전달되게 되도록 하였다.

2.3 PMLSM에서 발생력

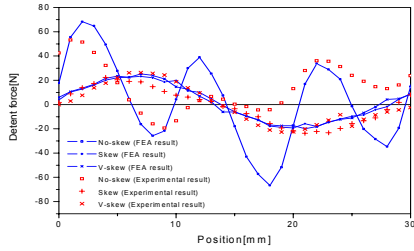
영구자석형 선형 동기 전동기에는 디텐트력, 추력, 수직력, lateral force 등의 힘이 발생한다. 일반적으로 디텐트력, 수직력, lateral force는 PMLSM의 전반적인 특성에 악영향을 끼친다. 특히, 디텐트력은 추력의 맥동으로 작용하여 기기 운전시 소음과 진동으로 작용한다.

이러한 디텐트력을 저감시키기 위해서 영구 자석 또는 철심에 skew를 적용하게 된다. 그러나 skew를 적용하는 경우, 영구 자석의 스큐 방향과 수직으로 작용하는 힘이 발생한다. 이를 이분법으로 나누어 보면 이동방향과 수직으로 작용하는 lateral force와 가동자의 진행방향과 같은 방향으로 작용하거나 반대 방향으로 작용하여 추력의 가감 성분으로 작용하여 제어를 어렵게 한다. 따라서 영구자석의 skew 방향에 수직으로 작용하고 있는 힘에 대한 고찰이 필요하다. 일반적으로 리니어 가이드는 가동자에 작용하는 수직력과 추력에 대해서는 마찰력을 최소화 할 수 있지만, lateral force와 같이 Z-축 방향으로 작용하는 힘은 리니어 가이드의 구조적인 특징으로 가동자와 리니어 가이드 사이의 마찰력으로 작용한다.

2.4 디텐트력

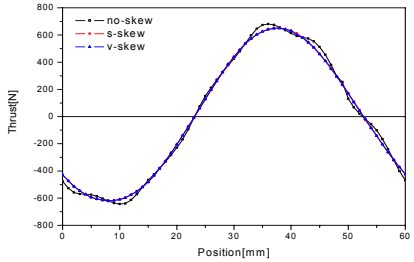
그림 3은 스큐 형태에 따른 디텐트력의 실험치와 FEA 결과이다. 스큐를 적용하지 않은 경우 67.45[N]으로 디텐트력의 영향이 가장 크며, 실험치의 오차가 큰 이유는 FEA 해석 결과 1mm씩 변위를 이동시킬 경우, 약 68N 이상의 디텐트력 변화가 있었다. 따라서 실험치에서 오차가 다소 크게 발생하였다. Skew모델과 V-skew 모델의 경우 각각 21.27[N]과 22.62[N]으로 skew를 적용하지 않은 No-skew 모델에 비하여 31.5[%], 33.5[%]로 감소하였다. 또한 Skew 모델과 V-skew 모델의 디텐트력 실험치는

22[N], 24.52[N]으로 해석치와 대동소이한 값을 얻었다.

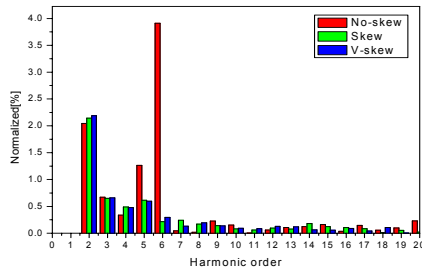


〈그림 3〉 디텐트력

2.5 추력

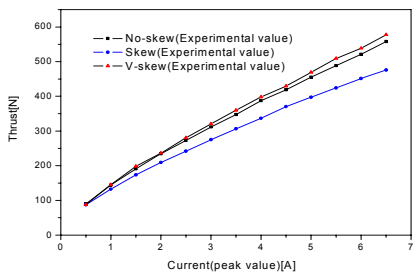


〈그림 4〉 추력



〈그림 5〉 고조파 분석

그림 4에는 스큐 형태에 따른 추력 특성을 나타내었다. 스큐를 시행하지 않은 경우의 추력은 피크치가 662.55[N]이고 일반적인 Skew 와 V-skew의 경우 637[N], 634.05[N]의 값을 갖는다. 스큐를 시행하는 경우는 스큐를 시행하지 않은 경우보다 추력이 96.15%, 95.76[%]로 다소 감소하였다. 그러나 그림 5의 고조파 분석에서 보듯이 추력 성분 중 5 고조파와 6 고조파의 현저한 감소로 왜형률이 No-skew모델 4.67[%]에서 skew 모델은 2.42[%],V-skew 모델은 2.45[%]로 감소하였다.

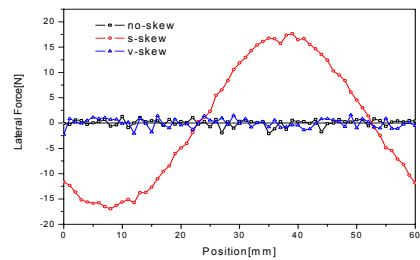


〈그림 6〉전류에 따른 추력 특성

그림 6은 전류에 따른 추력 특성을 나타낸 것이다. 추력은 전류에 비례하여 증가한다. 그러나 그림에서 보듯이 전류가 증가함에 따라 추력 밀도는 다소 감소함을 알 수 있다. 이는 전류가 증가함에 따라 기계적이 손실이 증가함에 따라 발생하는 것이다. 더욱이 Skew 모델의 경우 No-skew 모델과 V-skew 모델보다 추력 밀도의 감소폭이 더욱 큼을 알 수 있다. 이는 Skew 모델의 경우 lateral force가 다른 두 모델에 비하여 크기 때문이다. 또한 lateral force는 전류의 크기에 비례하므로 전류가 높아질수록 추력밀도는 더욱 감소하게 된다.

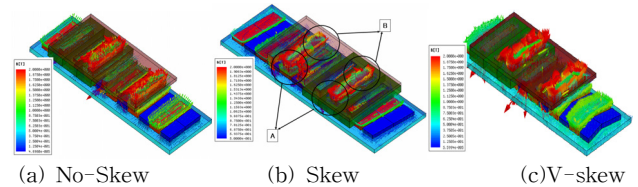
2.6 Lateral force

기존의 2D 유한 요소 해석에서는 전동기의 수직력, 추력, 디텐트력의 영향은 계산할 수 있었다. 또한 자석의 슬라이스 기법을 이용하여 스큐 효과를 적용함으로써, 스큐에 의한 추력 디텐트력도 고려할 수 있었다. 그러나 Z-축 방향으로 작용하는 힘에 대해서는 고려할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 3D 유한 요소 해석을 이용하여 Z-축 방향으로 작용하는 lateral force를 계산하였다. 그림 7는 스큐에 따른 lateral force이다. 스큐를 적용한 경우에는 17[N]의 lateral force가 발생한다. 이러한 lateral force는 가동자와 리니어 가이드 사이에 마찰력으로 작용하기 때문에 추력 값을 감소시키는등, PMLSM의 전반적인 특성에 악영향을 끼친다. 또한 이러한 lateral force는 스큐 길이가 증가 할수록 증가한다. 따라서 이러한 lateral force의 영향을 저감하기 위하여 V-skew 모델을 제안하였다. No-skew 모델과 마찬가지로 V-skew 모델의 경우, Z-축 방향에 대하여 대칭적인 구조를 갖기 때문에 lateral force가 "0"[N]이 된다. 그림 7에서 No-skew와 V-skew인 경우 lateral force는 "0"[N]이 되어야 하나 다소 값을 갖는 것은 유한 요소 해석의 오차로 인한 것이다. V-skew 모델의 경우 디텐트력과 추력은 스큐 모델과 대동소이한 값을 가지면서, lateral force가 발생하지 않는 장점을 갖는다.



〈그림 7〉 Lateral Force

그림 8에는 No-skew 모델(a)과 skew 모델(b), V-skew 모델(c)의 자속 벡터도를 나타내었다. 그림에서 보듯이 No-skew 모델과 V-skew 모델의 경우 Z-축방향에 대해서 대칭적인 자속 분포를 보이는 반면, 스큐 모델의 경우 Z-축 방향에 대해서 A 부분이 B 부분에 비해 자속 밀도가 높은 것을 알 수 있다. 이러한 비대칭적인 힘의 분포가 Z-축 방향으로 뒤틀리는 힘을 작용하게 함으로써 lateral force가 발생하게 된다.



〈그림 8〉 자속 벡터도

3. 결 론

본 논문에서는 디텐트력 저감을 위해 영구 자석에 Skew를 시행함에 따라 발생하는 lateral force에 관하여 고찰하였다. 전기자에 의한 자속과 영구자석에 의한 자속이 skew에 의해 비대칭적으로 위치하게 되며, 이러한 비대칭적이 자속 분포가 Z-축 방향으로 작용하는 lateral force를 발생시킨다. 또한 이러한 lateral force는 전류의 크기에 비례한다. 따라서 전류를 증가시키기에 따라 추력 밀도가 감소하여 PMLSM의 특성에 악영향을 준다. 따라서 본 논문에서는 이러한 비대칭 구조를 개선하기 위하여 V-skew 모델을 제안하여 lateral force를 대폭 저감하였으며, PMLSM의 전반적인 성능을 개선시켰다.

[참 고 문 헌]

[1] 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. 1157-160, 2002