영구 자석의 Skew 형태가 PMLSM의 특성에 미치는 영향 고찰

황인철, 윤병채, 장기봉, 김규탁
창원대학교 전기공학과

A study on the characteristics of PMLSM according to the skew-shape of Permanent Magnet

Hwang In-Cheol, 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

영구 자석형 선형 동기기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor: 이하 PMLSM)는 효율 및 추력 밀도가 높고 제어성능이 우수하며 고속, 고효율이 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 영구자석과 치-슬롯 구조에 의해 필연적으로 디텐트력이 발생하게 된다. 이런 디텐트력은 전동기 구동 시 추력의 맥동으로 작용하여 기기의 소음과 진동을 유발할 뿐만 아니라 제어 성능을 저하시킨다. 따라서 디텐트력의 저감은 필수적이다. 이러한 디텐트력의 저감을 위해 가장 일반적으로 사용하는 방법이 영구자석이나 철심에 스큐를 적용하는 것이다. 스큐를 적용하는 경우 디텐트력의 감소로 PMLSM의 운전 특성은 양호해진다.[1] 그러나, 스큐 적용에 따른 부작용 또한 발생하게 된다. 스큐를 적용한 경우 유전 추력이 다소 감소하며, 영구 자석과 철심이 비대칭 구조를 갖기 때문에 영구자석의 스큐 방향과 직각으로 작용하는 힘이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 V 형태의 스큐를 제안하여 기계손이 증가하게 된다. V형태의 스큐는 영구자석과 철심의 비대칭 구조를 개선하여 lateral force의 영향을 감소시켰다.[2] 스큐와 lateral force를 고려하기 위하여 3D 유한 유소 해석법을 사용하였으며, 이러한 유한 요소 해석 결과를 실험치와 비교함으로써 그 타당성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 기본 모델

본 논문에서는 스큐 모델을 기본 모델로 하였으며, 기본모델의 실험치와 이론치를 비교하여 3D 유한 요소 해석의 타당성을 입증하였고, No-skew 모델과 V-skew 모델을 3D 유한 요소 해석법으로 해석하여 스큐 형태에 따른 PMLSM 의 특성을 비교하였다.

그림 1은 기본 모델과 PMLSM의 실험을 위한 동특성 측정 시스템이다. 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 실제 운전시의 추력이라고 말 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 PMLSM의 Stator를 슬라이딩베드 위에 고정시켰다. 이때 슬라이딩 베드는 LM 가이드 위에 장착되어 있어 마찰력을 최소화시킴은 물론 이동이 가능하도록 하였다. 이 슬라이딩 베드를 로드셀(model : SBA-200L CAS)로 고정시킴으로서 PMLSM의 mover가 이동시에도 작용, 반작용 법칙을 이용 PMLSM의 stator에 가해지는 moving 추력을 실측할 수 있도록 하였다. 한편, mover의 속도를 실측하기위하여 리니어 스케일 1.0[㎛]를 장착하였다.

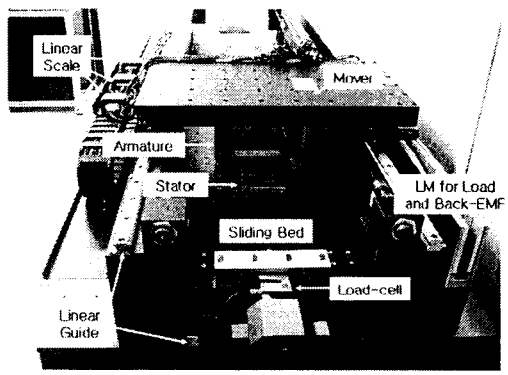


그림 1 기본 모델과 동특성 측정 시스템

표1 기본 모델의 사양

	Item	Symbol	Value
Stator (PM)	Width of PM	w_{PM}	26.5mm
	Height of PM	h_{PM}	9.0mm
	Length of PM	l_{PM}	95mm
	Pole pitch	p	30mm
	Skew length		10mm
	Residual magnetic flux density	Br	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	s	40mm
	Width of slot	w_s	13mm
Turns			304
Mechanical air-gap			1.4mm
Rated current			6.53A

또한, 리니어 스케일을 이용하여 mover를 1[mm]씩 이동시키면서 디텐트력을 측정하였다. 이때의 로드셀 용량은 10[kgf]이다.

전류 인가시의 정추력(steady state 추력)은 로드셀로 슬라이딩 베드를 고정시킴은 물론 mover인 전기자도 stage에 고정시켰다. 전기자에 삼상 전원을 인가하면 3상전류에 의해 이동자계가 발생한다. 영구자석은 고정되어 있으므로 부하각이 변하게 되며, 부하각 변화에 따른 발생 추력이 슬라이딩 베드와 연결된 로드셀에 전달되게 되도록 하였다. 로드셀의 출력 전압을 실시간 증폭기로 증폭시킨 후 이를 오실로스코프르를 이용하여 측정함으로서 부하각 변화에 따른 추력 변화를 실측할 수 있도록 하였다. 또한 동특성 측정 시스템에 양측식 선형 동기기를 부가적으로 설치하여 역기전력도 측정할 수 있도록 하였다. 표 1에 기본 모델의 사양을 나타내었다.

2.2 PMLSM에 작용하는 힘

그림 2에는 PMLSM에 작용하는 힘을 도식적으로 나타내었다. 영구자석형 선형 동기 전동기에는 디텐트력, 추력, 수직력, lateral force등의 힘이 발생한다. 일반적으로 디텐트력, 수직력, lateral force는 PMLSM의 전반적인 특성에 악영향을 끼친다. 디텐트력은 추력의 맥동으로 작용하여 기기 운전시 소음과 진동으로 작용한다. 이러한 디텐트력을 저감시키기 위해서 영구 자석 또는 철심에 스큐를 적용하게 된다. 그러나 스큐를 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 반향으로 작용하여 추력의 가감 성분으로 작용한다. 이는 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

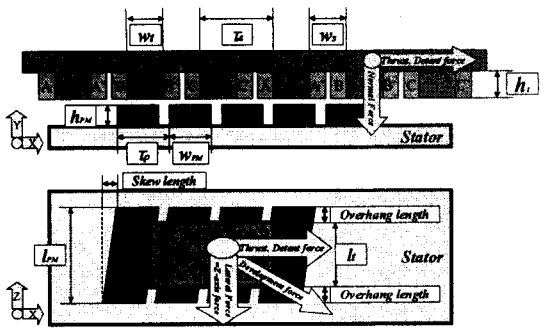


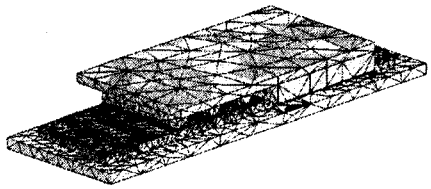
그림 2 PMLSM에서의 작용력

2.3 3D 유한 요소 해석

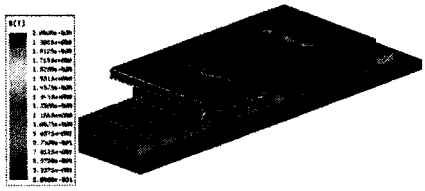
그림 3에는 유한 요소해석을 위한 요소 분할도(a)와 해석 결과인 자속 밀도(b)와 자속 벡터도(c)를 나타내었다. 요소의 개수는 35만개 내외이며 에너지 오차 비율을 0.5[%] 이내로 하여 계산하였다. 일반적으로 3D 유한 유소 해석은 2D 유한 요소 해석에 비해 해석 시간이 길지만 스큐의 영향과 lateral force의 영향을 고려하기 위해서는 반드시 3D 유한 요소 해석이 필요하다.

2.4 Skew 의 형태

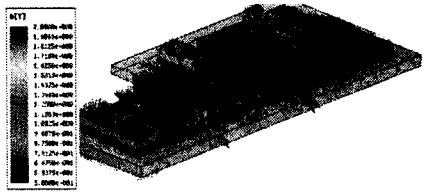
본 논문에서는 그림 3과 같이 3가지 형태의 자석 배열을 비교하였다. 이때 자석의 단면적은 일정하며, 스큐와 V-skew의 스큐 길이도 10.0[mm]로 일정하다.



(a) 요소 분할도



(b)자속 밀도



(c) 자속 벡터도

그림 3 유한 요소 해석

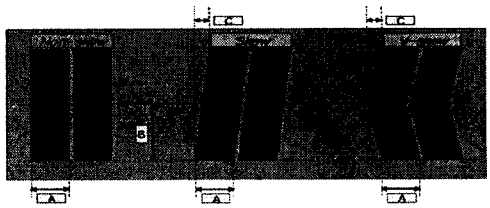


그림 4 영구자석의 3가지 skew 형태

2.4.1 디텐트력 비교

그림 5는 스큐 형태에 따른 디텐트력이다. 스큐를 적용하지 않은 경우 68.3[N]으로 디텐트력의 영향이 가장 크며, 스큐와 V-skew 의 경우 21[N]으로 스큐를 적용하지 않은 경우에 비해 30.7 [%]로 감소하였다. 또한 스큐 모델의 디텐트력의 실험치는 21.7[N]으로 해석치와 대동소이한 값을 얻었다. 이러한 디텐트력의 감소는 추력의 왜형률을 개선시켜 PMLSM의 운전 특성을 향상시킨다.

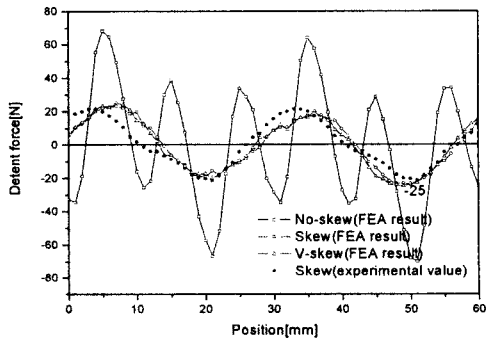


그림 5 디텐트력

2.4.2 추력 특성 비교

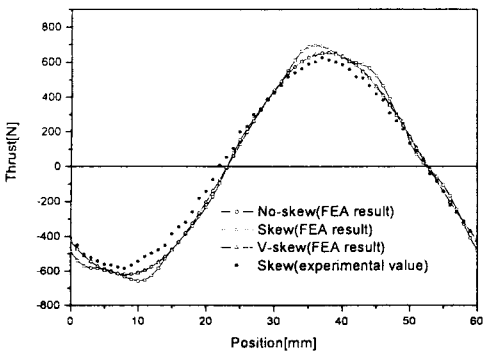


그림 6 추력

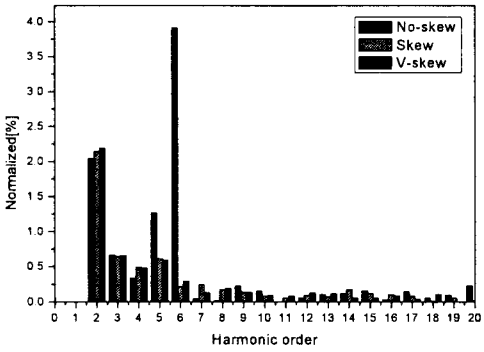


그림 7 고조파 분석

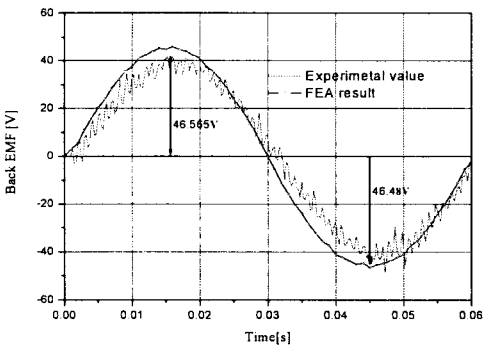


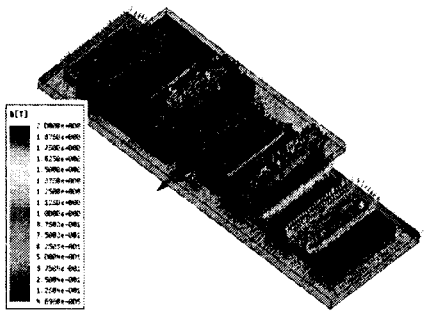
그림 8 역기전력

그림 6에는 스큐 형태에 따른 추력 특성을 나타내었다. 스큐를 시행하지 않은 경우의 추력은 피크치가 696[N]이고 일반적인 Skew 와 V-skew의 경우 650[N]의 값을 갖는다. 스큐를 시행하는 경우는 스큐를 시행하지 않은 경우보다 추력이 93.4[%] 로 다소 감소하였다. 그러나 그림 7의 고조파 분석에서 보듯이 추력 성분중 5 고조파와 6 고조파의 현저한 감소로 왜형률이 No-skew 모델 4.67[%]에서 skew 모델 2.42[%],V-skew 모델 2.45[%]로 감소하였다.

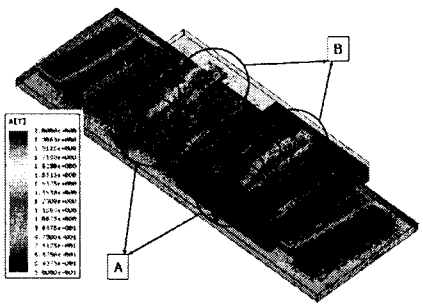
그림 8은 skew 모델의 가동자를 1[m/s]로 운전 시킨 경우의 역기전력 파형을 나타낸 것이다. 역기전력의 FEA 결과는 46.48V이며, 실험값은 46.5[V]로 측정되었다. 한편 발생 추력 특성을 살펴보면, 역기전력의 실험치로부터 계산한 추력의 최대치는 644.13[N]이며 FEA 계산치는 643.85[N]이다, 이때의 정격 전류는 6.53[A]이다. 이 두 개의 결과는 매우 잘 일치하는 양호한 결과를 얻었다. 그러나 로드셀을 이용하여 실측한 추력의 최대치는 623.78[N]으로 이론치 및 역기전력으로부터 간접적으로 실측한 추력보다 20[N] 작게 나타났다. 이러한 오차의 원인은 lateral force와 수직력에 의한 마찰력에 의한 기계손이 발생했기 때문이다.

2.4.3 Lateral force 특성 비교

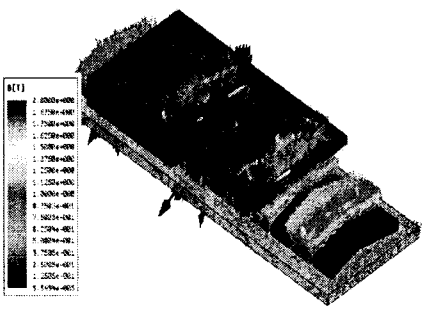
기존의 2D 유한 유소 해석에서는 전동기의 수직력, 추력, 디텐트력의 영향은 계산할 수 있었다. 또한 자석의 슬라이스 기법을 이용하여 스큐 효과를 적용함으로써, 스큐에 의한 추력 디텐트력도 고려할 수 있었다. 그러나 Z-축 방향으로 작용하는 힘에 대해서는 고려할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 3D 유한 요소 해석을 이용하여 Z-축 방향으로 작용하는 lateral force를 계산하였다.



(a) No-Skew 모델의 자속 벡터도



(b) Skew 모델의 자속 벡터도



(c)V-skew 모델의 벡터도

그림 9 자속 벡터도

일반적으로 스큐를 적용하는 경우 철심과 영구 자석이 skew angle 만큼 비틀어진 상태로 위치하기 때문에 Z-축 방향으로 비대칭적인 힘이 나타나게 된다.

그림 9에는 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 force 가 발생하게 된다.

그림 10은 스큐에 따른 lateral force 이다. 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[2]. 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 10에서 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.

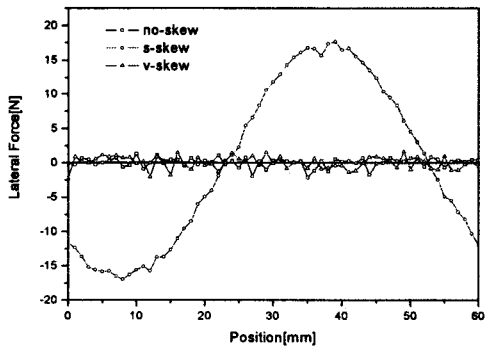


그림 10 Lateral force

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석의 스큐 형태가 PMLSM에 미치는 영향을 고찰하였다. 일반적으로 디텐트력을 감소시키기 위하여 사용하는 skew 모델의 경우 lateral force가 발생하여 PMLSM의 가동자와 리니어 가이드 사이에 마찰력으로 작용하여 추가적인 기계손이 발생한다. 이러한 lateral force의 영향을 감소시키기 위하여 V-skew 모델을 제안하였다. 이러한 V-skew 모델의 경우, 추력과 디텐트력은 단방향 스큐 모델과 대동소이한 값을 가지면서도, lateral force의 값은 "0"[N]의 값을 갖는 PMLSM을 설계할 수 있었다.

[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

[2]황 인 철, 한 광 규, 이 동 엽, 김 규 탁"영구 자석의 Skew 형태에 따른 선형 동기기의 특성에 관한 3D 유한 요소 해석", *2006년 대한전기학회 춘계학술대회 논문집(B)*, pp.112~114, 2006.