

## PMLSM의 디텐트력 저감을 위한 보조코어의 설계

장우성\*, 김지현\*, 안호진\* 장기봉\*, 김규탁\*  
창원대학교\*

### The Design of Auxiliary-core for Reducing Detent Force

Woo-Sung Jang\*, Jee-Hyun Kim\*, Ho-Jin Ahn\*, Ki-Bong Jang\*, Gyu-Tak Kim\*  
Changwon National University\*

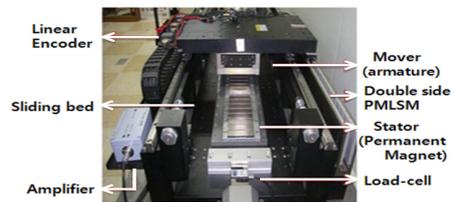
**Abstract** - PMLSM에서는 전기자 권선부의 슬롯-치 구조로 인한 디텐트력과 단부효과에 의한 디텐트력, 영구자석의 고조파 성분 자속에 의한 디텐트력이 발생한다. 따라서, 본 연구에서는 자기저항의 불연속으로 인한 디텐트력을 제거시키기 위하여 전기자 권선과는 독립된 자기회로를 가지는 보조코어의 설치를 제안하였다. 보조코어의 최적 설계는 유한요소 해석과 실험계획법을 이용하였으며 이론치와 실험치를 비교함으로써 본 연구의 타당성을 입증하였다.

동자가 이동할 때 작용-반작용에 의하여 PMLSM의 고정자에 가해지는 추력을 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 로드셀에 실시간 증폭기를 연결하여 로드셀에서 측정된 추력을 인디케이터를 통하여 실측할 수 있도록 하였다.

#### 1. 서 론

PMLSM(permanent magnet linear synchronous motor)은 효율 및 추력밀도가 높고 제어성능이 우수하며, 고속, 고효율 운전이 가능하다. 그러나 PMLSM은 단부효과로 인하여 자기회로가 불연속이 됨은 물론 이로 인하여 디텐트력이 발생한다. 이러한 디텐트력(Detent Force)은 전동기 추력(Thrust)의 맥동으로 작용하여 기기의 소음 및 진동의 원인이 되고 기기의 성능을 악화시키게 된다.[1]

이러한 디텐트력(Detent force)을 제거하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되어 왔으며, 그 중 가장 일반적으로 사용하는 방법이 영구자석이나 전기자 권선부를 스큐(Skew)를 시행하는 방법이 이용되고 있다. 그러나 영구자석에 스큐(Skew)를 시행하게 되면 치-슬롯에 의한 디텐트력과 영구자석의 착자에 의한 디텐트력은 감소시킬 수 있지만 단부효과에 의한 디텐트력을 저감시키지 못한다.[2-4] 따라서, 본 논문에서는 PMLSM의 단부효과로 인한 디텐트력을 저감시키기 위하여 전기자 권선과는 독립된 자기회로를 가지는 보조코어의 설치를 제안하였으며, 실제 실험과 FEM해석을 통하여 보조코어 설치에 따른 디텐트력을 고찰 하였다.



〈그림 1〉 실험장치

본 논문에서 논의하는 단부효과에 의하여 발생하는 디텐트력의 영향을 연구하기 위하여 영구자석에 skew를 시행하여 치-슬롯에 의한 디텐트력을 최소화 하였으며 스큐 시행에 따른 추력 감소분을 보상하기 위해 오버행 4[mm]을 실시하였다.

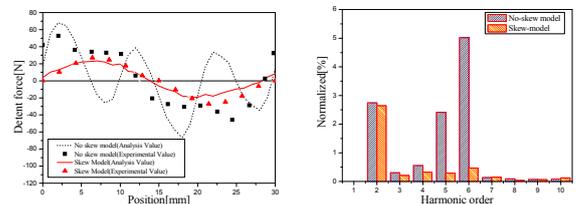
#### 2. 본 론

##### 2.1 영구자석의 스큐(Skew) 시행에 의한 디텐트력 제거

〈표 1〉 SPMSM 의 사양

	Items	Value
Stator (Permanent magnet)	Width of PM	26.5 mm
	length of PM	101mm
	Pole pitch	30 mm
	length of skew PM	10 mm
	Residual magnetic flux density	1.37 T
Mover (Armature)	Turns per Phase	304
	Height of teeth	18.8 mm
	Length of core	93 mm
	Width of teeth	13 mm
	Slot pitch	40 mm
	Rated current	6.53 A
	Mechanical air-gap	1.4 mm

표1은 해석모델의 기본사양을 나타내었으며, 그림 1에 본 연구에서 적용한 시험기를 나타내었다. PMLSM의 고정자, 즉 영구자석은 슬라이딩베드 위에 고정되어 있다. 슬라이딩 베드는 Linear Motion 가이드 위에 장착되어 있어 마찰력을 최소화시키는 물론 이동이 가능하도록 하였다. 그림 1과 같이 로드셀(model : SBA-200L CAS)로 슬라이딩 베드를 고정시킴으로써 PMLSM의 가



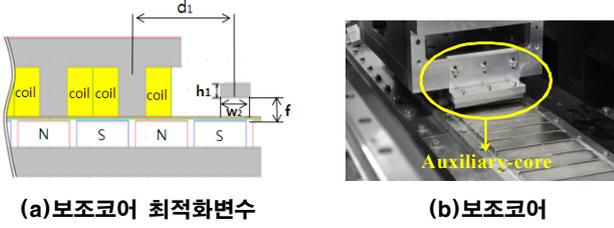
(a) 디텐트력 (b) 고조파

〈그림 2〉 디텐트력과 고조파

그림2 (a)에서는 no skew 모델과 skew model의 디텐트력을 비교하여 나타내었으며 그림(b)는 추력의 고조파 성분을 분석하여 나타내었다. no skew모델의 경우 추력의 2고조파 성분에 해당하는 end effect에 의한 디텐트력은 물론, 5고조파성분으로 주로 나타나는 영구자석의 단방향 착자에 의한 디텐트력, 6고조파 성분에 해당하는 슬롯-치 구조에 의한 디텐트력이 포함되어 디텐트력이 매우 크게 나타났으며 그 변화율 또한 매우 커 실험치에도 많은 오차가 나타남을 알 수 있다. 따라서, no skew모델의 추력 왜형률은 6.25[%]로 계산되었으며 이것이 소음, 진동의 큰 원인이 됨을 알 수 있다.

skew 모델의 경우 영구자석을 10[mm] 스큐시킴으로써 슬롯-치에 의한 디텐트력은 물론 영구자석의 고조파 성분에 의한 디텐트력도 거의 제거되어 오직 단부효과에 의한 디텐트력 즉 2고조파 성분만 나타남을 알 수 있으며 skew 모델의 추력 왜형률도 2.75[%]로 크게 감소하였다. 그러나, skew 모델에서도 단부효과에 의한 디텐트력인 2고조파 성분은 그대로 존재하므로 영구자석을 스큐시키도 단부효과에 의한 디텐트력은 제거시킬 수 없음을 알 수 있다.

### 2.3 보조코어의 원리 및 최적화



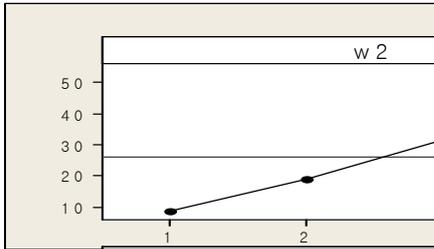
(a) 보조코어 최적화 변수

(b) 보조코어

〈그림 3〉 보조코어

그림3은 본 논문에서 제안한 보조코어를 나타내었다. 전자기권선과는 독립된 자기회로를 가지는 보조코어는 가동자의 전자기권선 주변에 부착되어 가동자에 의해 발생하는 디텐트력과 크기와 주기는 동일하고 방향이 반대인 디텐트력을 발생시켜 가동자의 디텐트력을 상쇄시키는 원리이다.

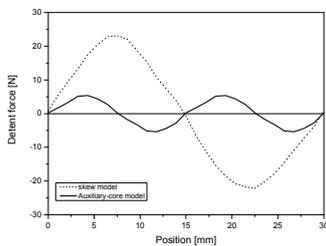
보조코어의 최적화는 유한요소 해석과 실험계획법을 이용하였으며, 보조코어의 설계변수로는 가동자로부터의 이격거리( $d_1$ ), 보조코어의 폭( $w_1$ ), 높이( $h_1$ ), 영구자석으로부터의 높이( $f$ )를 선정하였다. 보조코어에 의해 발생하는 힘은 가동자로부터의 이격거리에 따라 주기성을 가지므로 보조코어의 주기성을 파악한 후 디텐트력과 상반되는 힘을 발생시키는 보조코어의 위치를 선정 한 후 보조코어의 폭( $w_1$ ), 높이( $h_1$ ), 영구자석으로부터의 높이( $f$ )는 실험계획법을 이용하여 보조코어의 최적설계를 실시 하였다. 이때 보조코어의 이격거리( $d_1$ )는 50[mm]이다. 실험계획법을 통한 최적화를 위하여 그림 4와 같이 3개의 설계변수를 직교배열표를 작성하여 계산한 후 디텐트력과 반대되는 크기의 설계값을 선택 하였다.



〈그림 4〉 실험계획법(DOE)

따라서, 그림 2(a)의 단부효과에 의한 디텐트력인 23.3[N]과 유사한 크기를 갖는 변수를 선택하였으며 그 값은 보조코어의 폭( $w_1$ )은 9[mm], 높이( $h_1$ )은 7[mm]이며, 영구자석과의 높이방향 이격거리( $f$ )는 6[mm]이다.

### 2.4 가동자 수축에 따른 디텐트력의 영향



〈그림 5〉 수축 변형이 없는 경우의 디텐트력

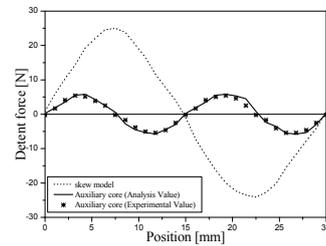
그림5는 가동자의 수축변형이 없을 시의 보조코어모델과 스큐모델의 디텐트력을 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 보조코어 적용시 단부에 의한 디텐트력 저감효과를 확인할 수 있다. 그러나 실제 PMLSM에서는 에폭시 몰딩에 의한 가동자의 수축현상이 발생하는데 이는 공극의 변화를 일으켜 디텐트력의 변화를 일으킨다. 보조코어는 이러한 수축변형에 따른 디텐트력의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문

에서는 가동자의 수축변형에 따른 보조코어의 이격거리 ( $f$ )에 대한 최적설계를 수행하였다.

〈표 2〉 수축변형정도에 따른 보조코어의 최적위치

수축정도[mm]	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
최적위치[mm]	6.3	6.4	6.6	6.7	6.8

표2는 가동자의 에폭시 몰딩에 의한 가동자의 수축변형 정도에 따라 디텐트력을 최소화 시킬 수 있는 이격거리( $f$ )의 최적값을 나타낸 것이며, 본 논문에서 제안한 보조코어 모델 적용의 타당성을 입증하기 위하여 그림 3(b)와 같이 실제 보조코어를 시작기에 장착하여 실험을 수행하였다. 보조코어는 깎개이지를 이용하여 영구자석과의 이격거리( $f$ )를 정밀하게 조절할 수 있는 구조로 제작하였다. 앞서 최적화 과정에서 영구자석으로부터의 높이( $f$ )는 6[mm]였지만 실제 모델에서 가동자의 수축변형량이 약 0.3mm로 측정되어 영구자석으로부터의 높이 즉  $f$ 를 표 2에 나타난 바와 같이 6.6mm로 하여 조정하였으며 이를 이론치와 비교하여 그림 7에 나타내었다



〈그림 7〉 0.3[mm]수축시의 디텐트력 비교

그림 7에서, 보조코어를 적용하지 않은 스큐모델의 경우, 디텐트력의 피크치는 24.17[N]으로 측정되었고, 보조코어를 적용하여 이격거리( $f$ )를 6.6mm로 조정했을 때 피크치가 5.42[N]으로 측정되어 약 77%의 디텐트력 저감율을 나타내었으며, 이론치 5.76[N]과 비교할 때 매우 만족스러운 결과를 얻었다.

그러므로 본 논문에서 제안한 보조코어 모델은 설계시에 예측하지 못한 에폭시의 몰딩으로 인한 변형량에 손쉽게 대응할 수 있고 쉽게 적용이 가능하므로 매우 유용하고 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 PMLSM의 단부효과에 의한 디텐트력을 저감시키기 위하여 독립된 자기회로를 갖는 보조코어 설치법을 제안하여 최적설계를 수행하였다. 제안한 보조코어는 실제 가동자의 에폭시 몰딩 수축변형에 의해 발생하는 디텐트력의 변화에 능동적으로 대처가 가능함을 알 수 있었으며, 이미 제작된 PMLSM에도 쉽게 적용이 가능하여 단부효과에 의한 디텐트력 저감에 유용한 방법이라 사료된다.

#### [참 고 문 헌]

[1] 임기채, “수치해석법을 이용한 영구자석형 선형동기전동기의 특성해석 및 제어기 구현”, 창원대학교 박사학위논문, 2000.2  
 [2] T. Li, G. Slemon, 1989. "Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 24, No. 6, pp.2901-2903,  
 [3]Takeo Ishikawa, Gordon R, Slemon, 1993."A Method of Reducing Ripple Torque in Permanent Magnet Motors without Skewing", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 29, No. 2,  
 [4]C. Studer, A. Keyhani, T. Sebastian and S. K. Murthy, 1997."Study of Cogging Torque in Permanent Machines", IEEE IAS Annual Meeting, pp.42-49,