

### 3D FEM을 이용한 PMLSM의 디텐트력 감소 및 추력 향상에 관한 연구

황인철\*, 이동엽, 김규탁  
 창원대학교 전기공학과

#### A Study on the Reduction of Detent Force and Enhancement of Thrust in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor by using 3D FEM

In-Cheol Hwang, Dong-Yeup Lee, Gyu-Tak Kim

Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Gyungnam, Korea

**Abstract** - This paper deals with skew and overhang effects of Permanent Magnet of PMLSM. The detent force and thrust characteristics considering skew and overhang effects of permanent magnet are analyzed by 3D FEM and the results are compared to experimental values

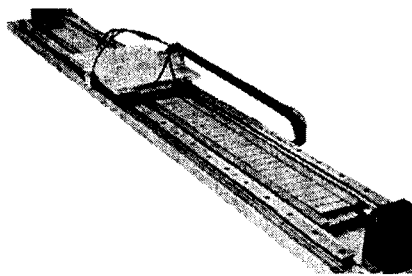
#### 1. 서론

영구자석형 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM)는 영구자석과 전기자의 치-슬롯 구조에 의해 필연적으로 디텐트력(detent force)이 발생하게 된다. 이런 디텐트력은 전동기 구동시 추력의 맥동으로 작용하여 기기의 소음과 진동을 유발할 뿐만 아니라 제어성능을 저하시킨다. 이러한 디텐트력을 저감하는 방법 중 영구자석 또는 철심에 스큐를 시행하는 방법이 가장 일반적이다.[1] 하지만, 스큐를 시행하면 발생 추력이 감소하는 단점이 있다. 따라서 이를 보상하기 위하여 영구자석의 오버행을 증가시켜 발생 추력을 증가시키게 된다. 또한 영구자석 스큐 시 영구자석의 스큐방향과 직각방향으로 작용하는 Lateral force가 발생하여 LM 가이드에 브레이킹력으로 작용하여 PMLSM의 제반 특성이 저하되고, 오버행 시행시 오버행길이에 따라 수직력이 증가하게 된다. 그러나 이와 같은 현상들은 2차원 FEA로는 해석이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 3차원 FEM 프로그램을 이용하여 스큐 적용과 오버행에 의한 효과가 PMLSM에 미치는 영향을 해석하였다.

#### 2. 해석 모델 및 실험 방법

##### 2.1 시작기

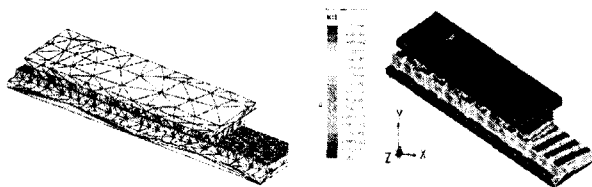
그림 1에 시작기 모델을 나타내었다. 본 모델의 영구 자석 스큐 길이는 극 간격( $\tau$ )의 1/3인 9.5[mm]이고, 오버행 길이는 공기 길이( $l_g$ )의 2.5배인 3[mm]이다.



〈그림 1〉 시작기

##### 2.2 3D 유한 요소 해석 적용

본 논문에서는 오버행과 스큐에 의한 영향을 해석하기 위해 3차원 유한 요소 해석 프로그램을 사용하였다. 그림 2는 3차원 유한요소 해석을 위한 요소분할도와 3D 유한요소 해석 결과 중 자속분포도를 나타내었다. 표 1에는 본 연구에서 적용한 모델의 사양 및 제원을 나타내었다.



〈그림 2〉 초기 요소 분할도와 자속 분포도

〈표 1〉 시작기의 사양

	Item	Symbol	Value (unit)	
Stator (PM)	Number of poles		12	
	Residual induction	$B_r$	1.3 (T)	
	Height of PM	$h_{PM}$	12.0 (mm)	
	Length of PM	$l_{PM}$	76.5 (mm)	
	Width of PM	$w_{PM}$	26.0 (mm)	
	Pole pitch	$\tau$	28.5(mm)	
Mover (Primary)	Turns / Phase	$N$	680	
	Height of coil	$h_c$	20.5 (mm)	
	Width of coil	$w_c$	11.0 (mm)	
	Height of teeth	$h_t$	23.7 (mm)	
	Width of teeth	$w_t$	23.0 (mm)	
	Slot pitch	$w_s$	38.0 (mm)	
	Width of core	$W_{core}$	73.5(mm)	
	Rated current	$I$	2.66 (A)	
Length of air-gap			$l_g$	1.2 (mm)

##### 2.3 실험 방법

역기전력의 측정은 그림 3.<a>와 같이 양축식 선형 동기기기를 일정 속도(1m/s)로 구동하여 시작기의 한 상의 전압을 오실로 스코프를 사용하여 측정하였다. 정추력의 측정은 그림 3.<b>와 같이 로드셀(model: SBR-200L, CAS)를 사용하여 측정하였다. 디텐트력은 로드셀(model: SB-20L, CAS)를 사용하여 측정하였으며, 가동자의 변위를 일정간격으로 이동하면서 디텐트력의 변화를 측정하였다.



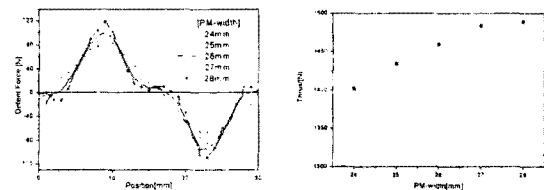
〈a〉역기전력 측정

〈b〉정추력 및 디텐트 측정

〈그림 3〉 실험 장비

#### 3. 해석 결과 및 실험 결과

##### 3.1 자석 폭 변화에 따른 특성 변화



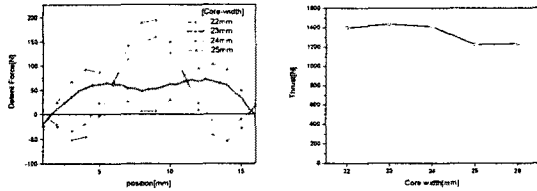
〈그림 4〉 자석 폭 변화에 따른 디텐트력 과 정추력

그림 4는 철심 폭을 일정하게 유지하고 자석의 폭( $w_{PM}$ )을 변화시킬 때 디텐트력과 정추력의 변화를 나타낸다. 자석의 폭이 증가함에 따라 디텐트력과 추력 모두 증가한다. 또한 자석 폭이 27[mm] 이상이 되면서 디텐트력과 추력 모두 포화현상이 나타나기 시작한다. 따라서 본 논문에서는 자석 폭을 26[mm]로 지정하였다.

##### 3.2 코어 폭 변화에 따른 특성 변화

그림 5는 코어 폭의 변화에 따른 디텐트력과 정추력을 나타낸 것

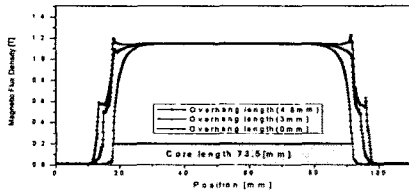
이다. 코어 폭이 23[mm]인 경우, 디텐트력의 피크치가 가장 작다. 또한 정추력이 다른 모델에 비하여 가장 높은 값을 갖는다.



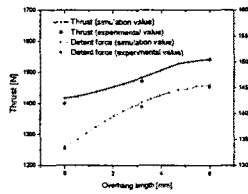
<그림 5> 코어 폭 변화에 따른 디텐트력과 추력의 변화

### 3.3 영구 자석의 오버행 길이에 따른 특성 변화

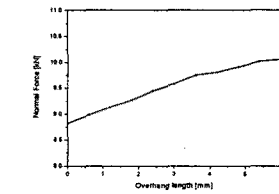
그림 6은 오버행 길이 변화에 따른 공극에서의 자속밀도 분포도이다. 철심의 z축 방향 길이는 73.5[mm]이다. 영구자석의 오버행 길이를 증가시키기에 따라 철심 유효 폭 내의 자속이 크게 증가하여 그림 7에서 보는바와 같이 발생추력이 증가함을 알 수 있다. 그러나 영구자석의 오버행 길이를 4.8[mm]이상으로 증가시키는 경우에는 유혹 공극 내에서의 자속은 그다지 증가하지 않고 철심의 z축 방향 끝단부에서의 스펀현상만 두드러지게 나타나 추력의 포화현상이 발생하게 됨을 알 수 있다. 그림 7은 영구자석의 오버행 길이 변화에 따른 디텐트력과 추력의 변화를 나타낸다. 오버행 길이가 증가함에 따라 디텐트력과 추력의 증가함을 볼 수 있으면 이러한 이유는 그림 6에서 보는바와 같이, 코어의 z축방향의 edge 부분에서의 자속 밀도가 증가하기 때문이다. 그러나, 오버행이 4.8[mm] 이상이 되는 경우, 포화 현상 때문에 철심 유효폭 내에서의 자속이 더 이상 증가하지 않기 때문에 추력의 증가폭이 줄어드는 것을 알 수 있다.



<그림 6> z축방향의 자속분포



<그림 7> 추력과 디텐트력

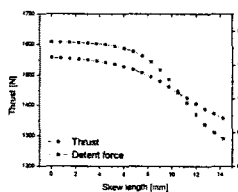


<그림 8> Normal force

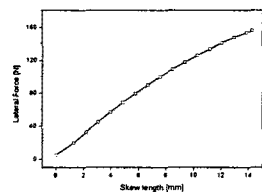
그림 8은 영구자석의 오버행 증가에 따른 수직력의 변화를 나타낸다. 오버행 길이의 증가에 따라 공극 자속 밀도가 증가하여 고정자와 영구자석 사이에 작용하는 수직력이 증가함을 볼 수 있고, 오버행이 4.8[mm]이상이 되면서 공극 자속 밀도의 포화현상으로 수직력의 증가폭이 감소함을 알 수 있다.

### 3.4 영구자석의 스큐에 따른 특성변화

일반적으로 추력 리플의 주 원인인 디텐트력을 줄이기 위하여 철심 또는 영구 자석에 스큐를 시행하는 방법을 사용한다.



<그림 9> 추력과 디텐트력



<그림 10> Lateral force

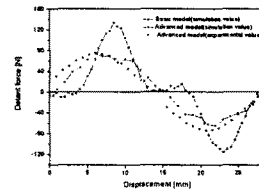
그림 9는 스큐에 따른 추력과 디텐트력의 변화를 나타낸 것이다. 스큐를 시행하지 않은 경우보다 14.25[mm](극 간격의 1/2) 만큼 스큐를 시행한 경우 디텐트력이 23.63[%]로 대폭 감소하였다. 그러나, 추력의 피크치는 약 8.7[%] 만 감소하여 디텐트력의 감소에 비하여 그 감소분은 매우 적음을 알 수 있다. 그러나 영구자석에 스큐를 시행하면 디텐트력 감소에 의한 발생 추력의 왜형률과 리플을 대폭 감소하나, PMLSM의 고정자의 안내 및 지지를 위한 LM 가이드

에 영구자석의 스큐방향과 직각으로 작용하는 lateral force가 발생하며 LM 가이드에 브레이킹력으로 작용하여 PMLSM의 제반 특성이 저하된다. 스큐에 따른 lateral force의 변화 특성을 그림 7에 나타내었다. 따라서, 본 연구에서는 디텐트력을 저감시키기 위하여 영구자석을 극간격의 1/3인 9.5[mm]만큼 스큐를 시행하였으며 영구자석의 스큐에 따른 추력 감소분을 보완하기 위하여 공극길이의 2.5배인 3[mm]만큼 영구자석의 오버행 길이를 증가시켜 기본모델의 제반 특성과 비교하여 본 연구의 타당성을 증명하였다.

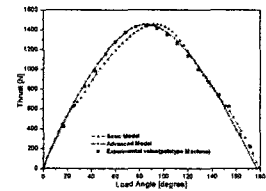
### 3.5 해석 결과

그림 11은 기본 모델과 개선 모델의 디텐트 특성을 나타낸 그래프이다. 기본 모델의 경우 디텐트력의 최대값이 133.4[N]으로 나타났다. 스큐길이를 극간격의 1/3인 9.5[mm]와 오버행을 공극의 2.5배인 3[mm]를 준 경우의 디텐트력은 75.31[N]으로 나타났으며, 실험에 의한 결과는 74.55[N]으로 나타났다.

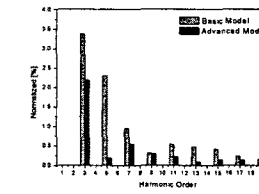
그림 12는 기본 모델과 개선 모델의 정추력을 비교한 그래프이다. 기본 모델의 경우 추력의 최대값은 1451.1[N]이며, 개선 모델은 1456.13[N]이면 시작기의 실험치는 1436.13[N]으로 나타났다. 실험치가 해석치보다 작게 나온 이유는 lateral force와 normal force에 의한 마찰력 때문이다. 또한 그림 13과 같이 고조파 특성을 가지며, 기본 모델의 왜형률은 4.29[%]이고 개선모델의 왜형률은 2.3[%]로 나타났다. 그러므로, 개선 모델이 기본 모델에 비하여 왜형률이 감소하여 소음, 진동 등이 발생하지 않는 양호한 운전 특성을 얻을 수 있으리라 사료된다. 그림 18은 부하각 90[deg]에서의 정상상태 추력을 나타냈으며, 기본 모델보다 개선 모델의 리플율이 8.2[%]에서 3.56[%]로 개선되었다. 그림 19는 역기전력 측정 결과를 나타낸다. 시작기를 1m/s로 구동시 역기전력의 최대값은 63.1[V]이고, 이때 한상의 권선은 병렬로 연결되어 있다.



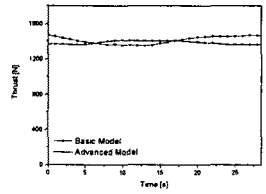
<그림 11> 디텐트력 비교



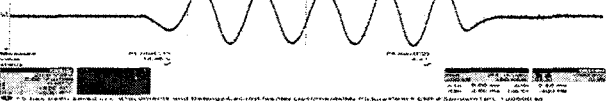
<그림 12> 정추력 비교



<그림 13> 고조파 분석



<그림 14> 정상 상태 추력



<그림 15> 역기전력(1m/s 구동시)

## 4. 결 론

본 논문에서는 영구자석에 오버행과 스큐를 적용시 PMLSM에 미치는 영향을 3D 유한 요소 해석과 실험을 통하여 연구하였다.

- 영구 자석 길이에 따른 추력 및 디텐트력 변화 연구
  - 철심의 코어 폭에 따른 추력 및 디텐트력 변화 연구
  - 오버행 적용에 따른 추력 향상 및 수직력의 변화 연구
  - 스큐 적용에 따른 디텐트력 저감 및 lateral force의 변화 연구
- 위와 같은 연구를 통하여 추력은 유지하면서, 왜형률과 리플을 저감하여 PMLSM의 운전 특성을 향상시킬 수 있었다.

본 연구는 산업자문부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다

### [참고 문헌]

[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