

영구자석 선형동기전동기의 디텐트력 최소화 기법 연구

임기채 · 우준근 · 홍정표 · 김규택  
 창원대학교 전기공학과

Study of Detent Force Minimization Techniques  
 in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

Ki-Chae Lim · Joon-Keun Woo · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim  
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Univ.

Abstract · Detent force is produced in a permanent magnet linear machine. It is generally an undesired effect that contributes to the output ripple of machine, vibration and noise. This paper analyzes detent force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM) by using various detent force minimization techniques.

A two-dimensional Finite Element Method(FEM) is used to predict detent forces due to structural factors and non-linearity. And moving node technique for the drawing models is used to reduce modeling time and efforts.

1. 서론

영구자석 선형동기전동기(PMLSM)는 선형유도전동기에 비해 개부프 제어성능이 떨어지고 높은 제조 비용이 든다는 단점이 있으나 계자원을 영구자석으로 대체한 간단한 구조를 가지므로 상대적으로 효율, 추력/중량비 및 에너지 밀도가 높고 고속화가 가능한 이점을 가지고 있다[1]. 특히, 최근의 에너지 밀도가 높은 자석 재료의 개발과 전력전자 기술 및 디지털 제어기술의 진보와 함께 직접적인 직선 추진력을 필요로 하는 정밀제어 시스템에 널리 응용되고 있다.

PMLSM은 기본적으로 회전형 영구자석 동기전동기와 구조 및 구동원리가 동일하나 상대적으로 큰 공극을 가지며 회전을 펼쳐 놓은 유한한 길이를 가진다. 따라서, 가동자의 이동 변위가 제한된 뿐만 아니라 회전기에서는 존재치 않는 수직력 및 단부효과가 존재하므로 설계시 이들에 대한 고려가 이루어져야 한다.

또한, PMLSM과 같은 영구자석 기기에서 반드시 검토되어야 하는 것이 영구자석과 슬롯의 상대적인 위치 변화에 따라 발생하는 디텐트력(detent force)으로 이는 전동기 구동시 발생 추력의 맥동으로 작용하여 기기의 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라 기기의 제어 성능의 저하를 가져오며 특히 정지상태에서의 정밀 위치제어를 어렵게 하는 요인으로 작용한다.

PMLSM의 디텐트력 저감을 위한 방법으로 영구자석 자극폭 조절법, 영구자석의 형상을 변화시키는 방법, 영구자석을 비대칭적으로 배치하는 방법, 전기자나 영구자석에 스류를 주는 방법 및 반체 슬롯을 이용하는 방법 등을 들 수 있으며 이러한 방법들을 적용시 기기의 제반 특성들의 변화에 주의할 필요가 있다.

일반적으로 디텐트력을 포함한 전기기기의 특성해석법으로 크게 이론해석법과 수치해석법을 들 수 있으며 수치해석법의 하나인 유한요소법(Finite Element Method : FEM)은 모델링 및 요소분할 등의 전처리 작업, 수치 계산과 후처리 작업등의 과정이 필요하기 때문에 기하학적인 설계 변수의 변화에 따른 특성해석이 어렵고 이론해석법에 비해 엄청난 계산기의 성능 및 해석 시간을 필요로 한다. 그러나, 해석모델에 대한 해석 결과의 정밀도가

높고 비선형 특성 및 복잡한 형상 해석이 가능하기 때문에 기기의 정밀한 특성해석에 적합하다. 특히, 최근의 전자 계산기의 성능 향상과 더불어 여러 가지 상용 해석 패키지가 개발됨으로써 여러 분야에서 그 적용이 보편화되고 있다.

본 논문은 PMLSM의 디텐트력 저감을 위한 여러 가지 방법들을 제안하고 기하학적 구조에 의한 특성 변화와 국부적인 포화에 의한 비선형 특성을 고려할 수 있는 유한요소법을 이용하여 검증하였다. 또한, 기하학적인 설계변수의 변화에 따른 해석모델들의 전처리 시간의 단축을 위해 초기 모델에 대한 절점이동 기법을 제시하였다.

2. 해석 이론

본 논문은 PMLSM의 특성해석을 위해서 복잡한 형상과 재료의 비선형성의 고려가 용이한 유한요소법을 이용하였다. 유한요소법을 이용하여 기기의 설계치수의 변화에 따른 특성을 해석하고자 하는 경우 해석모델의 치수 및 형상 변화에 따른 각각의 모델링 및 재질 정수 입력 및 요소분할 등의 전처리 작업을 필요로 하기 때문에 특성해석에 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 요소분할 데이터를 이용한 절점이동 기법이 제안된 바 있으며[2] 본 논문에서는 초기 모델에 대한 절점이동 기법(이하, 모델 절점이동 기법)을 제안한다. 요소분할 데이터를 이용한 절점 이동 기법은 간단한 치수의 변화에 대한 모델링에는 매우 효과적이거나 절점의 이동으로 인한 요소의 변형이 발생할 수 있고 다소 복잡한 모델에 대하여 적용이 어렵다는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 요소분할 전의 초기 모델링 데이터의 절점을 이동시킨 후 요소분할을 통하여 각각의 설계변수 변화에 따른 전처리 데이터를 자동으로 생성하도록 하는 기법을 이용하였다.

그림 1은 모델 절점이동 기법을 이용한 슬롯 형상 변화 및 자석폭 조정의 예를 보이고 있으며 각각의 설계변수 변화에 따른 초기모델의 형상 변경을 행한 후에는 재 요소분할이 요구된다. 또한, 모델 절점이동 기법은 해석모델의 전처리 데이터 중 노드의 위치만을 가변 시키므로 한 번의 전처리 작업이 요구되며 나머지 가변 치수

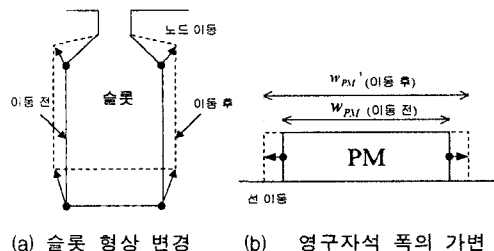


그림 1. 모델 절점이동 기법의 기본 개념

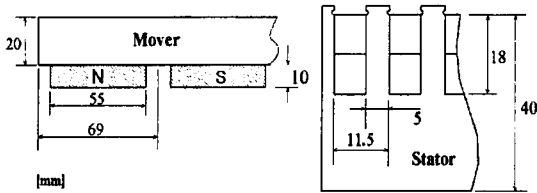


그림 2. 해석모델의 구조 및 치수

표 1. PMLSM의 자원

구분	항목	기호	값(단위)
	극간격	$\tau$	69 (mm)
	슬롯피치	$\tau_s$	11.5 (mm)
고정자 (1차축)	슬롯폭	$w_s$	5 (mm)
	정격전류	I	3 (A)
	매극매상당 슬롯수	q	2
가동자 (영구자석)	높이	h	10 (mm)
	폭	$w_{PM}$	55 (mm)
	재질		Nd-Fe-B
	잔류자속 밀도	$B_r$	1.12 (T)
공극	기계적 공극	$g_m$	5 (mm)

모델에 대해서는 배치처리(batch)를 행함으로써 모델링 시간을 크게 감소시킬 수 있다.

### 3. PMLSM의 구조 및 자원

PMLSM의 디텐트력은 운전시 추력(thrust) 리플로 작용하기 때문에 PMLSM의 위치 정밀도 및 속도제어에 큰 영향을 미친다. 특히, 영구자석부가 고정자가 되는 단 1차형 PMLSM의 경우 추력의 리플로서 1차축 슬롯과 영구자석에 의한 디텐트력 뿐만 아니라 1차축 단부와 영구자석 사이에 작용하는 디텐트력이 존재한다.

본 논문에서는 1차축 슬롯과 영구자석에 의한 디텐트력 저감을 위하여 단 2차형 PMLSM을 기본 해석모델로 선정하였으며 그림 2와 표 1에 해석모델의 고정자 및 가동자의 치수와 기본 재원을 나타내었다.

### 4. PMLSM의 디텐트력 저감법

디텐트력은 영구자석과 슬롯구조에 기인한 공극 고조파 성분의 증가에 의한 것으로 회전기의 코강토크와 동일한 특성을 가진다. 따라서, 회전기에서 적용되었던 많은 연구들이 직선기에 그대로 적용될 수 있다.

본 논문에서는 2차축에 대하여 영구자석의 두께 및 폭 변화와 영구자석의 비대칭 배치법에 대하여 검토하고 1차축에 대하여 반폐 슬롯 구조에 의한 디텐트력 특성을 해석하였다.

#### 4.1 영구자석 두께 변화

그림 3은 PMLSM의 영구자석의 두께를 조절하는 경우 디텐트력과 전자기력(electro-magnetic force, 이하 EM force)의 최대치를 나타내고 있다. 기본 해석모델의 영구자석 높이는 10(mm)로 이때의 자기력은 약 250(N)이나 영구자석의 두께가 작아지는 경우 디텐트력의 감소량에 비하여 자기력의 저하가 뚜렷이 나타나고 있다. 따라서, 전기자 전류에 의한 영구자석의 감자 고려 및 요구 추력을 만족시키기 위해서는 자석의 두께 선정 범위가 극히 제한되며 디텐트력 저감을 위한 적절한 방법이 될

수 없다.

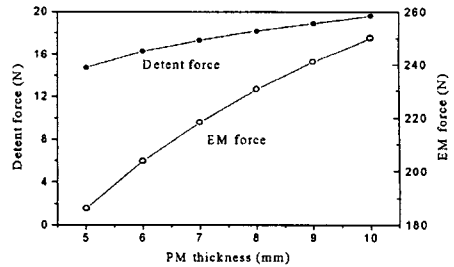


그림 3. 영구자석 두께에 따른 디텐트력 및 전자기력

#### 4.2 영구자석 폭 변화

디텐트력의 기본과 성분은 슬롯 피치에 대한 영구자석 폭을 적절히 조절함으로써 효율적으로 제거가 가능하다 [3]. 그림 4는 일정 슬롯 피치에 대한 영구자석의 폭을 조절하는 경우 디텐트력과 전자기력의 최대치에 대한 변화를 나타내고 있다. 매극매상당 슬롯수  $q$ 가 1인 경우로 슬롯피치는  $\tau/mq$ 로 23(mm)이며  $q$ 가 2인 경우는 11.5 (mm)의 슬롯 피치를 가진다.  $q$ 가 1인 경우 영구자석 폭 51(mm)부근에서 디텐트력은 최소값을 가지며 전자기력은 최대가 된다.  $q$ 가 2인 경우는 영구자석 폭이 증가함에 따라 자기력은 다소 증가하나 누설 자속의 증가로 인해 포화현상을 보이고 있다. 일반적으로 PMLSM의 디텐트력을 최소화하기 위한 일정 슬롯피치  $\tau_s$ 에 대한 영구자석 폭은 정수  $n$ 에 대하여 다음 식  $(n + 0.25) \cdot \tau_s$  만족하면 된다[3]. 해석결과는 제시된 조건과 근사한 차이를 보이고 있으며 이는 해석시 철심 재질의 비선형 특성을 고려하였기 때문이다.

#### 4.3 영구자석의 비대칭 배치

PMLSM의 디텐트력은 슬롯피치에 대하여 주기성을 가지고 있으므로 푸리에 급수에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_d(x) = p \cdot F_{d, pole}(x) = p \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n \frac{2\pi}{\tau_s} x) \quad (1)$$

단,  $F_{d, pole}(x)$ 은 1극에 의해 발생하는 디텐트력이다.

식 (1)에서 동일 자속의 통로가 되는 2극에 대하여 서로 디텐트력이 상쇄되도록 영구자석을 배치하여 식 (2)와 같이 디텐트력을 최소화시킬 수 있다.

$$F_d(x) = \frac{p}{2} \cdot \left\{ F_{d, pole}(x) + F_{d, pole}(x + \frac{\tau_s}{2}) \right\} \quad (2)$$

$$= p \cdot \sum_{n=2,4,6}^{\infty} a_n \sin(n \frac{2\pi}{\tau_s} x)$$

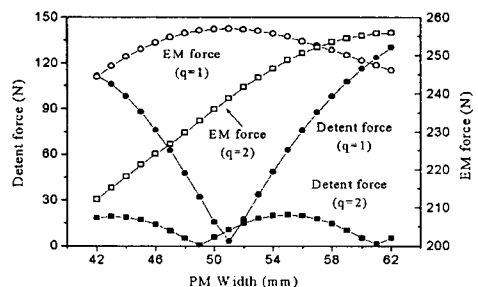


그림 4. 영구자석 폭에 따른 디텐트력 및 자기력

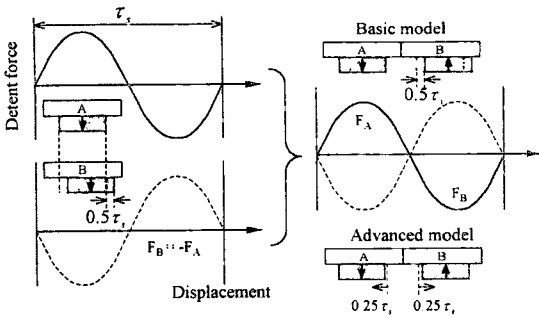


그림 5. 영구자석 배치에 의한 디텐트력 저감

그림 5는 영구자석의 비대칭 배치에 의한 디텐트력 최소화 기법의 예로써 디텐트력의 저감을 위해 A와 B극에 의한 디텐트력이 180도(0.5r)의 위상차를 가지도록 영구자석을 배치한 것으로 B극을 +0.5r만큼 이동시킨 간단한 구조(basic model)를 생각할 수 있으며 본 논문에서는 2극의 상호 대칭성 및 슬롯피치에 따른 자석 배치의 한계를 고려하여 A와 B극의 영구자석을 초기 위치에서 ±0.25r로 배치한 구조(advanced model)에 대한 유한요소 해석을 행하였다.

그림 6, 7은 영구자석 폭이 49, 52, 55(mm)인 경우 영구자석의 비대칭 배치에 의한 디텐트력 특성과 부하각에 따른 전자기력을 나타낸 것으로 적절한 자석의 위치를 선정함으로써 디텐트력을 최소화시킬 수 있음을 보여준다. 결과로부터 자석 폭이 증가함에 따라 디텐트력에 직류성분이 증가하고 있으며 이는 자석 폭 증가에 따른 영구자석에 의한 누설 자속의 증가 때문이라고 사료된다. 또한, 전자기력은 영구자석 폭이 55(mm)인 경우 최대치가 246(N)으로 기본 모델에 대해 3(N)의 미소한 감소를 보인다.

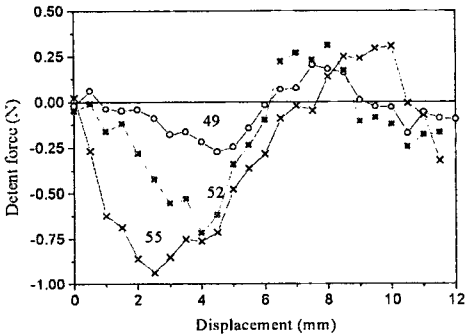


그림 6. 영구자석 배치에 의한 디텐트력

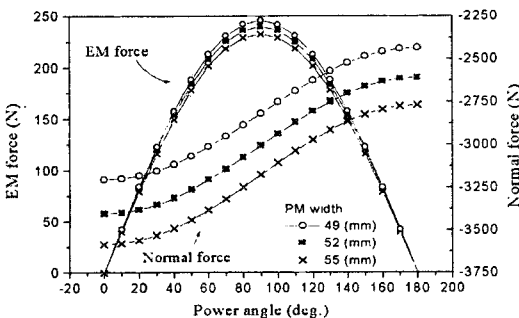


그림 7. 영구자석 배치에 따른 전자기력 및 수직력

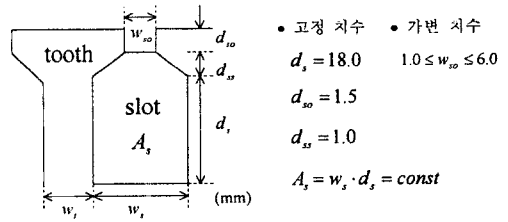


그림 8. 반폐 슬롯 모델과 기본 치수

- 고정 치수    • 가변 치수
- $d_s = 18.0$      $1.0 \leq w_{30} \leq 6.0$
- $d_{s0} = 1.5$
- $d_{s2} = 1.0$
- $A_s = w_s \cdot d_s = const$

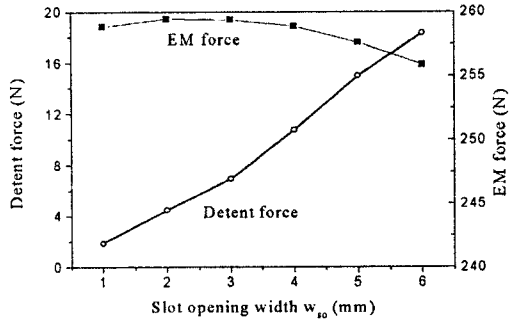


그림 9. 슬롯 개구폭에 따른 디텐트력 및 전자기력

### 4.3 반폐 슬롯

1차측 슬롯을 반폐 슬롯으로 설계하는 경우 디텐트력은 슬롯 개구폭  $w_{30}$ 에 의해 크게 의존한다. 이는  $w_{30}$ 의 감소에 의해 공극 자속밀도에 대한 슬롯 고조파 성분의 영향이 줄어들기 때문이다. 그림 8은 반폐 슬롯 모델의 기본 구조 및 각 부의 치수를 나타내고 있다.

그림 9는  $w_{30}$ 를 권선 두께를 고려하여 1에서 6(mm)로 변화시키는 경우 디텐트력의 최대치에 대한 해석결과를 보인 것이다. 슬롯 개구폭의 증가는 공극자속에 대한 슬롯 고조파의 영향을 증가시켜 디텐트력이 커지고 실효공극이 증가하므로 전자기력은 다소 감소한다. 또한, 슬롯 개구폭이 작아지는 경우 1차측 전류에 의한 누설 자속의 증가로 전자기력이 다소 감소함을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 PMLSM을 대상으로 한 여러 가지 디텐트력 저감 기법들에 대해 유한요소법 해석을 행하였으며 이러한 기법들의 적용이 PMLSM의 추력에 미치는 영향을 검토하였다. 또한, 설계변수 변화에 따른 유한요소 해석의 모델링 효율의 향상을 위해 모델 절접이동 기법을 사용하였으며 이는 유한요소법에 의한 특성해석 시간을 크게 단축시켰다.

PMLSM의 디텐트력은 영구자석의 폭과 배치에 따라 크게 영향을 받으며 일정 추력의 요구시 영구자석의 비대칭 배치법이 유리하다.

### (참고 문헌)

- [1] 山田, "리니어모터 응용 핸드북", 도서출판 世和, 1988.
- [2] I. S. Jung, S. B. Yoon, J. H. Shim, D. S. Hyun, "Analysis of Force in a Short Primary Type and a Short Secondary Type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", Conference of IEMDC '97, Milwaukee, pp.MC1-8.1-MC1-8.3, 1997.
- [3] T. Yoshimura, H. J. Kim, Watada, S. Torii, D. Ebihara, "Analysis of the Reduction of Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magn., Vol. 31, No.6, pp.3737-3739, 1995.