

PMLSM의 디텐트력 최소화를 위한 Notch의 적용에 관한 연구

이 동엽*, 주 건 배, 황 예, 김 규 탁
 창원대학교 전기공학과

A Study of Detent force Minimization Using Notch in Slotted Pemanent Magnet Linear Synchronous Motor

Dong-Yeup Lee*, Jian-Pei Zhou, Rui Huang, Gyu-Tak Kim
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Univ.

Abstract - In this paper, thrust ripple is minimized using notch and slot-aperture width adjustment in a slotted PMLSM and then optimal design was achieved by using a neural network. This paper has used the moving model node technique to reduce the time and the effort for calculation according to changing design parameters. As the result, the detent force of optimal model is decreased from 9.44[N] to 0.97[N] greatly compare with it of basic model. The thrust is decreased 1.3[%] from 342.07[N] to 337.48[N] a little.

1. 서 론

최근 밀링 머신, 선반과 같은 직선 운동을 요구하는 시스템에서는 회전형 전동기를 대신하여 직접 직선 추력을 발생시키는 직선형 전동기가 각광을 받고 있다. 특히, 영구자석 선형동기전동기(PMLSM)는 선형유도전동기에 비해 개루프 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 진보로 인하여 급진적인 발전이 이루어지고 있다.

하지만, 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 정지 상태에서의 정밀 위치 제어를 어렵게 하는 요인으로 작용한다. 따라서 PMLSM의 성능 향상을 위하여 디텐트력은 반드시 저감하여야 한다.

PMLSM의 디텐트력 저감을 위한 방법으로 영구자석 자극폭 조절법, 영구자석의 형상을 변화시키는 방법, 영구자석을 비대칭적으로 배치하는 방법, 전기자나 영구자석에 스류를 주는 방법 및 반폐 슬롯을 이용하는 방법 등이 소개되어 왔다. 하지만 이러한 디텐트 저감법은 디텐트력의 제거에 따라 추력도 같이 줄어드는 현상이 발생되었다[2][3].

따라서, 본 논문에서는 기존의 디텐트 저감법의 단점을 보완하기 위하여 notch를 적용하여 PMLSM의 디텐트력을 저감하였다. 해석 모델에 단순히 철심에 notch를 적용함으로써 디텐트력의 저감에 따른 추력의 변화를 억제할 수 있었다. 또한, 기하학적인 설계변수의 변화에 따른 해석모델들의 전처리 시간의 단축을 위해 초기 모델에 대한 절점이동 기법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 기본 모델

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 1차측 슬롯과 영구자석에 의한 디텐트력 뿐만 아니라 1차측 단부와 영구자석 사이에 작용하는 디텐트력이 존재한다. 따라서, 본 논문에서는 1차측 슬롯과 영구자석에 의한 디텐트력 저감을 위하여 단 2차형 PMLSM을 기본 모델로 선정하였으며 그림 2와 표 1에 해석모델의 고정자 및 가동자의 치수와 기본 재원을 나타내었다.

표 1. PMLSM의 재원

구 분	항 목	기 호	값(단 위)
	극 간 격	τ	69 (mm)
고 정 자 (1차측)	슬롯피치	τ_s	11.5 (mm)
	슬롯폭	w_s	변수
	정격전류	I	3 (A)
	매극매상당 슬롯수	g	2
가 동 자 (영구자석)	높이	h	10 (mm)
	폭	w_{PM}	60 (mm)
	재질		Nd-Fe-B
	잔류자속 밀도	B_r	1.12 (T)
공 극	기계적 공극	g_m	변수

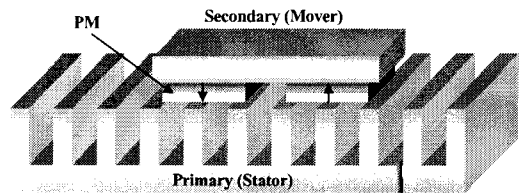


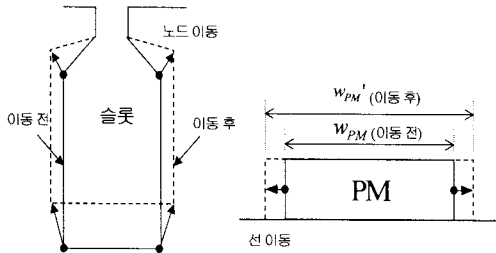
그림 1. 기본 모델

2.2 모델 절점 이동기법

본 논문은 PMLSM의 특성해석을 위해서 복잡한 형상과 재질의 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 본 논문에서는 초기 모델에 대한 절점

동 기법(이하, 모델 절점이동 기법)을 제안하였다.

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.



(a) 슬롯 형상 변경 (b) 영구자석 폭의 가변

그림 2. 모델 절점이동 기법의 기본 개념

그림 2는 모델 절점이동 기법을 이용한 슬롯 형상 변화 및 자석폭 조정의 예를 보여주고 있다.

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

그림 3은 모델절점 기법을 유한요소법에 적용한 흐름도를 보여준다.

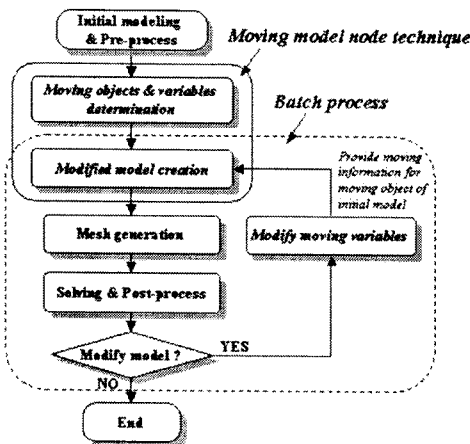


그림 3. 흐름도

2.3 해석 모델의 선정

기본 모델의 추력을 향상 시키기 위하여 슬롯 개구폭과 공극의 변화에 따른 추력 및 디텐트 특성변화를 확인하여 그림 4과 5에 나타내었다.

그림 3에서 발생 추력이 최대가 되는 공극 2[mm], 슬롯 개구폭은 5.5[mm]인 경우이다. 하지만 이때의 디텐트력도 발생 추력이 증가함에 따라 증가하는 양상을 보인다. 그러므로 본 논문에서는 최대 추력과 최소 디텐트력을 동시에 만족시키기 위하여 발생 추력을 최대인 슬롯

개구폭을 5[mm]로 하는 경우에 대하여 여러 가지 notch를 적용하였다.

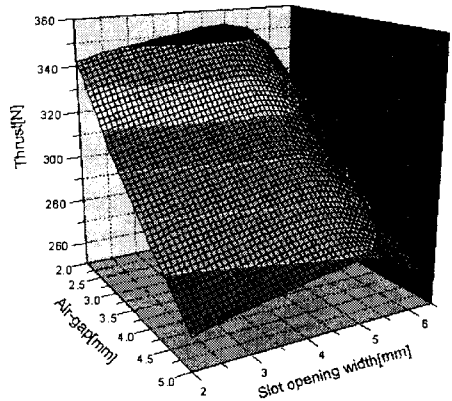


그림 4. 공극과 슬롯 개구폭에 따른 발생 추력

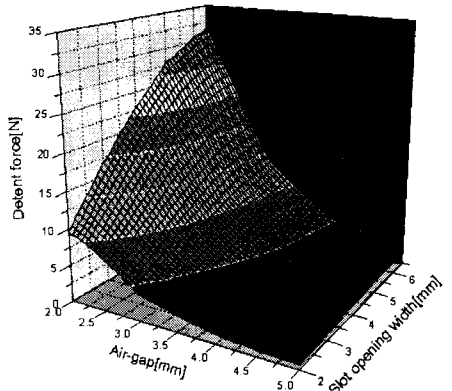


그림 5. 공극과 슬롯 개구폭에 따른 디텐트력

2.4 디텐트력 저감을 위한 Notch의 적용

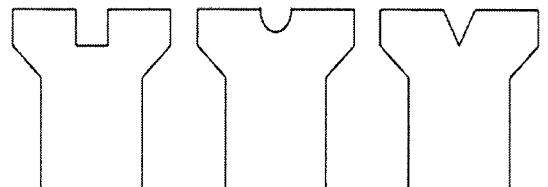
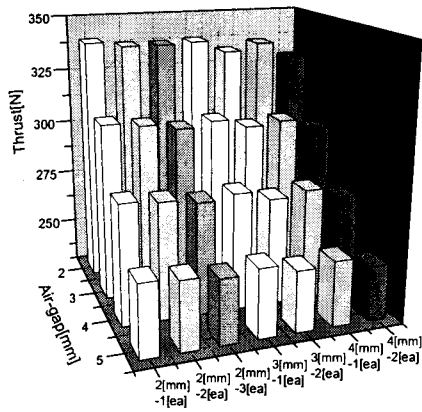
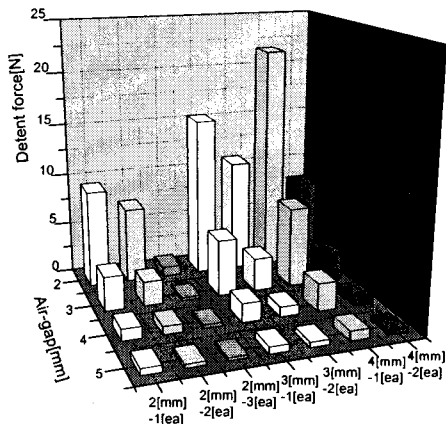


그림 6. 여러 가지 형태의 notch 형상

먼저, 여러 가지 형태의 notch에 따른 경향을 보기 위하여 그림 6과 같이 사각형, 원형, 삼각의 형태로 notch를 적용하였으나 그에 따른 디텐트력의 변화는 notch의 형태와 상관없이 거의 동일하게 나타났다. 따라서 notch의 형상은 디텐트력에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 사료되어 본 논문에서는 notch의 형상을 정사각형으로 설정하여 notch의 폭과 삽입되는 notch의 개수를 변수로 설정하여 디텐트력을 저감 시켰다.



(a) Thrust



(b) Detent force

그림 7. notch의 폭과 개수, 공극에 따른 발생 추력 및 디텐트력 특성

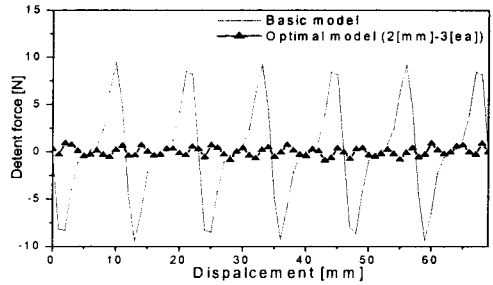
그림 7은 슬롯 개구폭이 5[mm]인 경우에 대하여 notch의 폭과 개수, 공극의 변화에 따른 발생 추력 및 디텐트력 특성을 보여준다.

그림 7에서 알 수 있듯이 notch의 폭과 개수는 공극이 클 경우에는 거의 영향이 없이 동일한 특성이 나타났다. 하지만, 공극의 감소로 인한 추력 및 디텐트력의 증가로 인하여 그 특성이 판이하게 나타났다. notch를 2[mm]의 크기로 3개를 적용한 경우 다른 경우에 비하여 공극이 감소함에 따라 디텐트력은 거의 변화가 없으며 발생 추력은 크게 향상되는 결과를 도출 할 수 있었다.

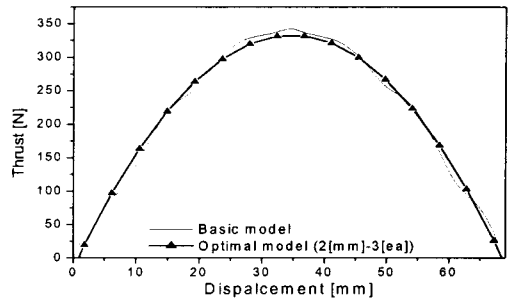
해석 모델에 대하여 notch를 2[mm]의 크기로 3개를 적용하여 공극을 2[mm]로 한 경우에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다.

그림 8은 디텐트력 및 발생 추력을 기본모델(notch를 적용하지 않은 모델)과 비교하여 나타내고 있다.

디텐트력은 기본 모델의 9.44[N]에 비하여 10배나 감소한 0.97[N]로 나타났으며, 이때의 발생 추력은 342.07[N]에서 337.48[N]로 1.3[%]감소하였다. 하지만, 발생 추력의 감소분 보다 디텐트력이 크게 저감됨으로 인하여 효율이나 성능향상이 나아져 양호한 결과라고 사료된다.



(a) Detent force



(b) Thrust

그림 8. 최적 모델의 해석 결과

3. 결 론

본 논문에서는 PMLSM을 대상으로 한 여러 가지 디텐트력 저감 기법들을 소개하여 그에 따른 양상의 변화를 보여주었다. 기존의 여러 가지 저감 기법의 단점인 발생 추력의 향상에 따른 디텐트력의 증가를 보완하기 위하여 notch를 적용하였으며 notch의 폭과 개수를 변화시키며 특성 해석을 수행하였다.

그 결과, 발생 추력의 증가에 따른 디텐트력 증가를 크게 저감시켰으며, 어느 일정한 notch의 개수와 폭을 적용하며 공극의 변화에 상관없이 크게 디텐트력을 저감 할수 있음을 확인하였다. 또한, 설계변수 변화에 따른 유한요소 해석의 모델링 효율의 향상을 위해 모델 절점이 동 기법을 사용하였으며 이는 유한요소법에 의한 특성해석 시간을 크게 단축시켰다.

[참 고 문 헌]

- [1] 임기재, "수치해석법을 이용한 영구자석 선형 동기전동기의 특성해석 및 제어기 구현", 국립중앙대학교박사학위논문, 2000
- [2] J. 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.