

영구자석형 선형 동기전동기의 디텐트력 저감방식에 관한 특성해석 및 상호 비교

장석명 *윤인기 이성호 이준호*
충남대학교 충북과학대학*

Analysis of the Reduction of Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

S.M.Jang. *I.K.Yoon. S.H.Lee. J.H.Lee*.
Chungnam Nat'l Univ. C.Tech*

Abstract - The problem in improving the positioning precision of a permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM) is the large detent force caused by the permanent magnet. The detent force is thought to arise from the difference of the position of a permanent magnet end and a tooth position. In this paper, Three methods of reducing detent force is presented. The first method is adjusting the width of permanent magnet. The second method is varying the shape of armature teeth. The third method is the arrangement of the permanent magnet end. This paper compares with the ratio of reducing the detent force according to the three methods.

소해석을 통해 상호 비교, 검토하였으며, 위의 방식들을 동시에 고려한 보다 나은 디텐트 맥동 저감 방식을 제시하였다.

2. PMLSM의 디텐트력 저감방식

2.1 영구자석의 자극폭 변화

가동자석형 PMLSM은 영구자석의 자극폭이 변화함에 따라 디텐트력의 맥동이 변화하는 것을 알 수 있다. 영구자석의 자극폭을 자극폭/슬롯간격 기준으로 3.25, 4.25, 5.25... $(n+0.25, n=정수)$ 로 설계할 경우 디텐트력을 대폭 줄일 수 있다[2]. 본 논문의 해석 모델은 1차축 전기자의 슬롯피치가 14mm이다. 따라서 디텐트력을 최소화시키기 위하여 영구자석의 자극폭 t_1 을 60mm로 설계, 제작하였다. 이는 영구자석의 자극폭/슬롯간격 비가 4.25에 근접하게 되어 최소한의 디텐트력을 갖기 때문이다. 표1위의 해석에 사용된 PMLSM의 제원을 나타낸 것이다.

1. 서 론

영구자석형 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM)는 선형 유도전동기에 비해 개루프 제어성능이 떨어지고 제조원가가 높다는 단점에도 불구하고, 제어원으로 영구자석을 사용하기 때문에 상대적으로 효율이 높고 추력/중량비가 높아 고 추력화, 소형화 및 고속화가 가능하다는 이점이 있다. 최근 들어 고 에너지밀도를 가지는 영구자석의 개발 및 제조원가의 하락, 전력전자 기술과 디지털 제어기술의 발전에 의해 PMLSM의 단점이 많이 보완되었다. 또한 PMLSM은 추력/전류비가 높고 제어가 용이하며 직접 직선 추력을 발생하므로 최근 들어 고속 지상운송 수단으로서 뿐만 아니라 고충빌딩용 고속 엘리베이터, 반송 시스템 및 서보 시스템의 구동원으로 많이 연구, 검토되고 있다.

표1 PMLSM의 제원

| 구 분 | 제 원 | |
|------|-----------------|-----------|
| 1 차축 | 상수 | 3 |
| | 극간격 | 126(mm) |
| | 슬롯간격(r_s) | 14(mm) |
| | 슬롯폭 | 8 (mm) |
| | 적층폭 | 123.9(mm) |
| | 매극매상슬롯수 | 3 |
| 2 차축 | 슬로당 권선수 | 46 |
| | 높이 | 10 (mm) |
| | 폭길이 | 66 (mm) |
| | 길이 | 60 (mm) |
| 공극 | 재질 | NdFeB |
| | 잔류자속밀도(B_r) | 1.1 (T) |
| 공극 | 기계적 공극 | 5 (mm) |

PMLSM의 구동원리는 회전형 영구자석형 동기전동기의 구동원리와 동일하다. 그러나 상대적으로 큰 공극과 기하학적 형상에 따른 유한 길이의 구조 때문에 수직력, 단부효과, 이동자의 지지구조 등 설계 시에 추가적으로 고려해야하는 사항들이 존재하게 되어 회전기와는 구별되는 특성이 존재한다. 특히, PMLSM은 영구자석과 전기자의 치 사이에서 필연적으로 디텐트력(detent force)이 발생하게 된다. 이러한 디텐트력은 전동기의 추력 맥동의 원인이 되어, 기기의 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라 기기의 제어성능을 악화시킨다. 따라서 PMLSM의 성능을 향상시키기 위해서는 디텐트력에 대한 정밀한 해석 및 이에 대한 저감이 매우 절실하다. 이러한 디텐트력(detent force)을 저감시키기 위한 방법들로 영구자석의 자극폭을 적절히 조정하는 방법[2], 영구자석을 슬롯을 기준으로 하여 서로 다른 방향으로 슬롯피치의 1/2만큼 이동시켜 배치하는 방법[1], 그리고 1차축 치 형상을 변화시켜 디텐트력을 저감하는 방법 등의 연구결과가 발표 되었다.

그림 1은 단 2차축 PMLSM의 모델을 나타내고 있다. 영구자석 자극폭/슬롯간격 비를 고려한 PMLSM의 2차축과 이를 고려하지 않은 PMLSM과의 디텐트력의 맥동 크기를 비교하기 위하여 자극폭 $t_1 = 80\text{ mm}$ 인 PMLSM의 2차축을 해석모델로 선정하였다. 그림 2는 공극 길이가 5mm일 때 각각의 영구자석 자극폭 t_1 이 각각 60mm, 80mm인 두 모델을 FEM을 통하여 해석한 결과를 나타내고 있다.

본 논문에서는 PMLSM의 추력 저감을 위하여 상술한 3가지 방법에 대하여, 디텐트력 저감 특성을 유한오

그림 2에서 보듯이 디텐트력이 맥동하는 정도는 가동자가 이동하면서 변화하게 되는 디텐트력의 최대치와 최소치의 차로써 정의하였다. 그림 2에서 디텐트력 저감을 위하여 영구자석의 자극폭(60mm)을 고려한 PMLSM의 디텐트력은 이를 고려하지 않은 영구자석의 자극폭

(80mm)을 갖는 PMLSM에 대하여 약 79.8%를 저감시킬 수 있었다.

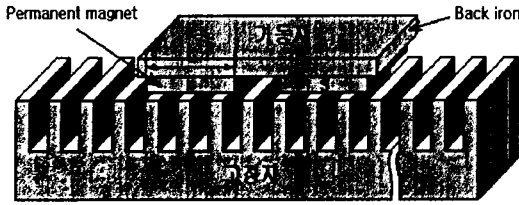


그림 1 디텐트력 저감을 위한 영구자석 자극폭의 변화

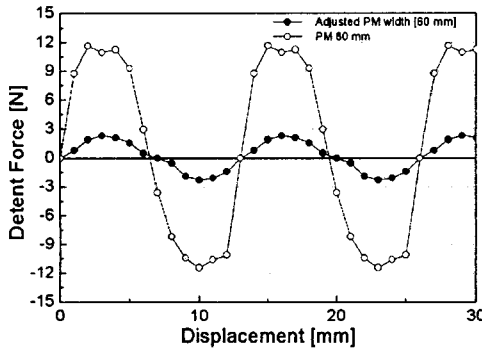


그림 2. 영구자석 자극폭 조정에 따른 디텐트력 비교

2.2 전기자 슬롯형상을 고려한 디텐트력의 저감

그림 3은 전기자 슬롯형상의 변화에 따른 디텐트력의 맥동 변화를 알아보기 위하여 개방형슬롯과 반폐 슬롯을 갖는 각각의 전기자를 나타내었다. 치형상에 따른 디텐트력 해석에 있어서 가동자인 2차측은 자극폭 $t_1 = 80\text{ mm}$ 을 갖는 영구자석을 해석모델로 선정하였다. 그림 4는 공극 5mm에서 슬롯간격이 14mm인 개방형슬롯을 갖는 모델과 반폐슬롯을 갖는 모델 사이의 디텐트력 맥동의 차이를 보여주고 있다. 그림 4에서 보듯이 반폐슬롯 모델에서의 디텐트력이 개방형슬롯 모델의 디텐트력에 대하여 약 46.4%가 저감되었음을 알 수 있다.

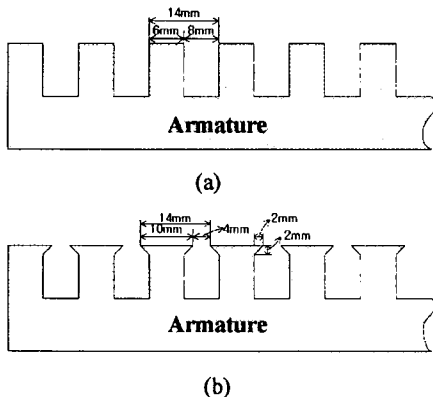


그림 3. 1차측 전기자의 치형상
(a) 개방형 슬롯을 갖는 전기자
(b) 반폐슬롯을 갖는 전기자

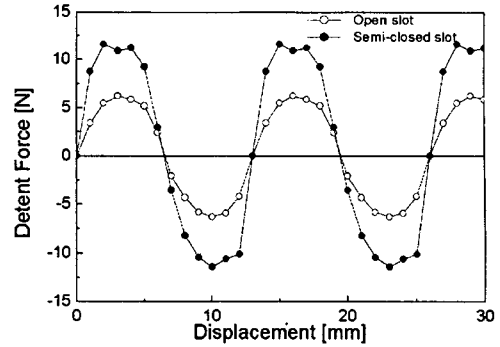


그림 4. 전기자 슬롯형상에 따른 디텐트력 비교

PMLSM에서 발생하는 디텐트력은 2차측 영구자석 모서리 부분과 전기자 치의 모서리 부분사이의 상호작용으로부터 생기므로 반폐슬롯을 사용함으로써 디텐트력을 저감시킬 수 있었다. 반면, 반폐슬롯을 사용하지 않고 해서 치와 치 사이에서의 누설 자속이 증가하여 누설 리액턴스가 증가할 것으로 사료된다.

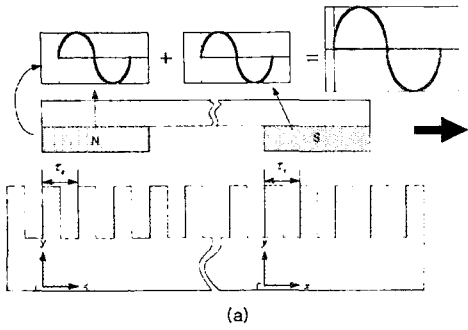
2.3 영구자석 배치에 따른 디텐트력 저감

1차측 전기자 자극의 중심을 기준으로 하여 영구자석을 재배치시키게 되면 그림 5(a)와 같이 각각의 2차측 영구자석과 전기자 치 사이에서 발생하는 디텐트력은 서로 합하여져 맥동은 자극수에 비례하여 증가하게 된다. 그러나 슬롯간격을 τ_s 라 하였을 때 그림 5(b)와 같이 다른 한 쪽의 영구자석을 $\tau_s/2$ 만큼 이동시키면 각각의 영구자석에 의한 디텐트력은 상쇄되어서 이론상으로 0이 되어진다.

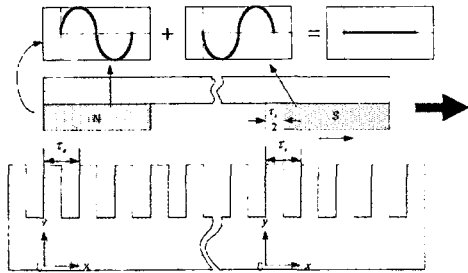
그림 6은 공극길이 5mm하에서 디텐트력 저감을 위하여 2차측 영구자석을 재배치 시켜준 PMLSM과 이를 고려하지 않은 PMLSM과의 디텐트력 해석 결과를 나타내고 있다. 여기서 두 모델의 영구자석의 자극폭은 80mm로 동일하다. 그림 6에서 보듯이 영구자석 재배치를 통한 PMLSM에서의 디텐트력은 이를 고려하지 않은 PMLSM에 대하여 약 86.5%를 저감시킬 수 있었다.

2.4 두 방식을 동시에 고려한 디텐트력의 저감

그림 7은 디텐트력 저감 방식에 따른 맥동의 크기를 나타내고 있다. 그림 7에서 보듯이 디텐트력 저감을 위한 방법 중 영구자석의 자극폭을 변화시켜 주는 방법과 영구자석의 재배치를 통한 방법을 동시에 고려하였을 때 PMLSM에서의 디텐트력을 92.7% 저감시킬 수 있다. 그림 8은 부하각에 따른 PMLSM의 추력을 나타낸 것이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 영구자석 자극폭의 조정을 통한 방식과 영구자석 재배치를 통한 방식을 동시에 고려해 주었을 때 부하각에 따른 추력에서의 디텐트력의 맥동이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 8에서 영구자석의 자극폭과 재배치를 동시에 고려한 경우의 부하각에 따른 추력은 부하각 90° 에서 약 58[N]으로 영구자석의 폭을 고려하지 않은 경우보다 12[N]정도가 작은 알 수 있는데, 이는 영구자석의 자극폭을 고려하여 디텐트력을 저감시킬 때 자극폭/슬롯간격 비를 5.25, 6.25등으로 그 비를 높이면 부하각에 따른 추력을 증가시킬 수 있다.



(a)



(b)

그림 5 영구자석 배치에 따른 디텐트력
(a) 디텐트력을 고려하지 않은 PMLSM
(b) PM의 재배치를 통하여 디텐트력을 고려한 PMLSM

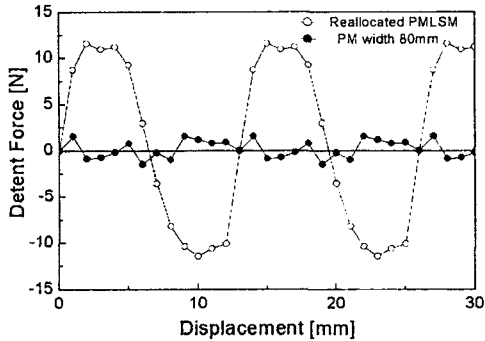


그림 6. 영구자석의 재배치를 통한 디텐트력 맥동 비교

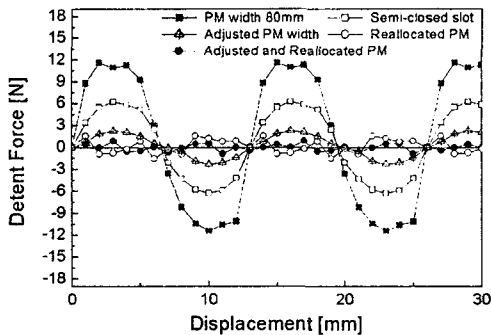


그림 7. 디텐트력 저감 방식에 따른 디텐트력 맥동 비교

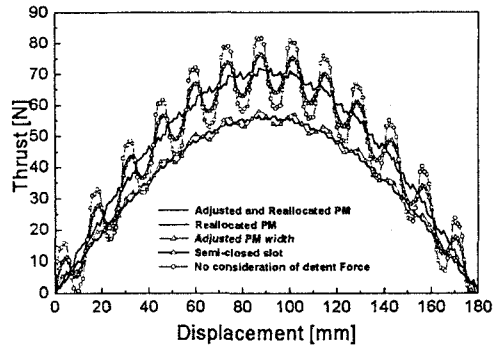


그림 8 디텐트력 저감 방식에 따른 맥동

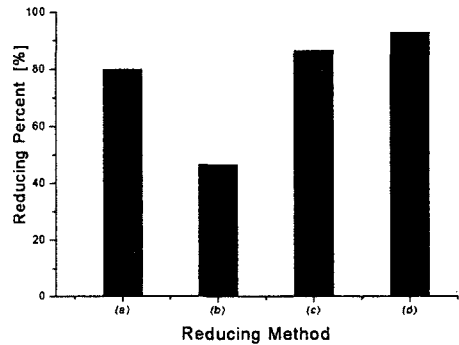


그림 9 디텐트력 저감방식에 따른 저감율

3. 결 론

본 논문에서는 PMLSM의 디텐트력의 맥동을 저감시키는 방식에 대하여 언급하였으며, 디텐트력 저감 방식에 따른 저감율을 FEM을 통하여 정량적으로 계산할 수 있었다. 디텐트력 맥동 저감 방식 중 1차축이 반폐슬롯을 갖는 방식에서는 디텐트력의 맥동을 46.4% 저감시킬 수 있었으나, 누설리액턴스가 증가하여 효율이 감소하며, 추력에도 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 디텐트력의 맥동 저감을 위해서는 영구자석의 폭을 변화시켜 주는 방식과 영구자석의 재배치를 통한 방식 그리고 이들 두 가지 방식을 동시에 고려하여 주는 방식을 이용하게 되면 약 90%이상의 디텐트력의 맥동 저감효과를 얻을 것으로 사료된다

[참 고 문 헌]

- [1] T.Yoshimura, H.J.Kim, M.Watada, S.Torii, D.Ebihara, 'Analysis of the Reduction of Detnet Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor' IEEE Trans.Mag. vol.31.pp 3728-3730. 1995.
- [2] 정인성 '개선된 수치해석 기법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 특성해석' 2000.2 한양대학교 박사논문
- [3] S.A.NASAR, I.BOLDEA 'Lenear motion electric machines' 1976
- [4] Jacek F. Gieras, Zbignies J.Piech 'LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS' 1999. July