

가동 코일형 영구자석 선형 동기전동기의 성능 향상에 관한 연구

이동엽, 장기봉, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

A study of performance improvement for moving coil type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

Lee Dong-Yeup, Jang Ki-Bong, Kim Gyu-Tak
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won University

Abstract - In this paper, the notch of teeth, the shape changing and skew of permanent magnet are used to reduce the detent force. And addition, overhang of permanent magnet is applied to increase thrust because thrust is decreased by skew. As the results, detent force is decrease greatly about 98%. And, the ripple ratio of thrust is decreased from 11.34[%] to 0.25[%].

1. 서 론

영구자석 선형 동기 전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : 이하 PMLSM)는 전기자의 형태에 따라 슬롯리스형 PMLSM과 슬롯형 PMLSM으로 분류되어지고, 또한, 가동자의 형태에 따라 가동자가 전기자인 단 1차형과 가동자가 영구자석인 단 2차형으로 구분되어진다[1]. 이 중, slotted PMLSM은 효율 및 추력 밀도가 높고 고속, 고효율이 가능하다는 장점이 있어 각종 FA기기, OA기기 등의 구동원으로 널리 이용되고 있다. 그러나, 슬롯형 PMLSM은 영구자석형 회전기에서의 코깅 토크와 같이 영구자석과 치-슬롯의 상대적인 위치 변화 때문에 필연적으로 디텐트력이 발생하게 된다. 발생하는 디텐트력은 구동 시 기기의 추력 맥동으로 작용하여 소음 진동을 유발할 뿐 아니라 제어 성능을 크게 저하시킨다. 따라서, 고속 정밀 제어가 요구되는 분야에서는 추력 리플의 영향을 최소화하는 설계가 반드시 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 단 1차형태인 슬롯형 PMLSM의 추력 리플로써 작용하는 디텐트력을 저감시켰다. 디텐트력의 저감 기법으로는 가동자인 전기자의 치부분에 노치를 적용하고, 고정자인 영구자석에 형상변화 및 스큐를 시행하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1과 표1은 각각 슬롯형 PMLSM의 해석모델과 설계 사양을 보여준다.

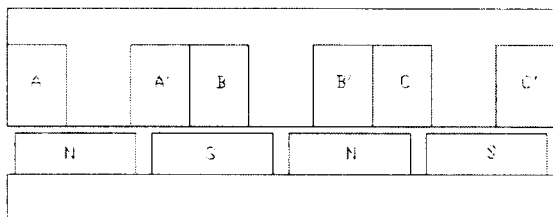


그림 1 해석 모델

표 1 해석모델의 설계 사양

| | 항목 | 단위 |
|---------------|--------|------------|
| 가동자 (전기자) | 슬롯 간격 | 40[mm] |
| | 슬롯 폭 | 26[mm] |
| | 슬롯 깊이 | 17.8[mm] |
| | 정격 전류 | 6.53[Arms] |
| | 권선방식 | 집중권 |
| | 도체수 | 304[Turn] |
| | 가동자 길이 | 240[mm] |
| | 축방향 길이 | 95[mm] |
| 고정자 (영구자석) | 극 간격 | 30[mm] |
| | 높이 | 9[mm] |
| | 폭 | 26.5[mm] |
| | 재질 | Nd-Fe-B |
| 잔류자속 밀도 | | 1.32[T] |
| 기계적 공극 | | 1.4[mm] |
| 정격 추력 | | 650[N] |

2.2 디텐트력 저감 기법

2.2.1 노치의 적용

치-슬롯 구조에 의한 디텐트력을 저감시키기 위하여 치 부분에 노치(작은 홈)를 적용하였다. 디텐트력은 적용되는 노치의 모양에 따라서는 변화가 없으므로 본 논문에서는 직사각형 형태를 노치의 형상으로 선정하였다 [2]. 노치의 적용을 위한 디텐트력의 특성을 분석하기 위해 가동자의 자화영역에서 발생하는 에너지 차를 함수화하여, 회전자 표면의 자화 분포에 의한 에너지 차를 상쇄시키기 위한 노치의 위치를 결정하였다.

치와 영구자석의 상호 작용에 의해 발생하는 디텐트력은 슬롯형 PMLSM의 운전시에 고조파 성분으로 나타나며, 영구 자석 수와 슬롯 수의 최소 공배수를 극수로 나누는 값의 배수가 되는 고조파 성분이다. 디텐트력의 주파수의 수식은 식 (1)과 같다.

$$f_{pn} = \frac{nG}{P} = 3n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

여기서,

P : 영구자석의 수,

G : 영구자석 수와 슬롯 수의 최소 공배수

n : 디텐트력의 고조파 차수

그림 2는 노치의 위치를 결정하기 위한 해석 모델의 형상 및 주기를 나타낸다. 설치되는 노치의 위치는 치 위에 있어야 함으로 노치의 설치 가능 구간은 $(13/60)\pi$ 부터 $(27/60)\pi$ 까지 이다.

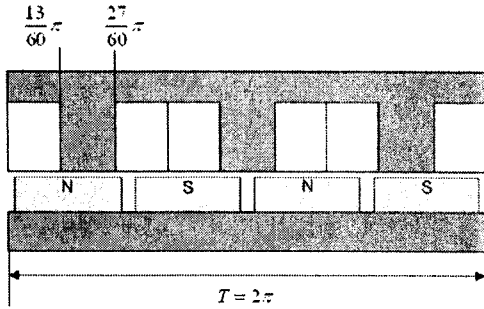


그림 2 해석모델의 주기

노치의 위치는 식 (2)와 같이 유도된다.

$$x = \frac{(2k-1)\pi}{f_{Fn}}, \quad k=1,2,3,\dots \quad (2)$$

식 (2)에 의한 노치의 설치 위치를 디텐트력의 고조파 차수에 대하여 계산해보면 식 (3)과 같이 계산되어지고, 정리하여 나타내면 그림 3과 같다.

$$\begin{aligned} n=1 & \quad \frac{1}{3}\pi, \frac{3}{3}\pi \\ n=2 & \quad \frac{1}{6}\pi, \frac{3}{6}\pi, \frac{5}{6}\pi \\ n=3 & \quad \frac{1}{9}\pi, \frac{3}{9}\pi, \frac{5}{9}\pi, \frac{7}{9}\pi, \frac{9}{9}\pi \\ n=4 & \quad \frac{1}{12}\pi, \frac{3}{12}\pi, \frac{5}{12}\pi, \frac{7}{12}\pi, \frac{9}{12}\pi, \frac{11}{12}\pi \end{aligned} \quad (3)$$

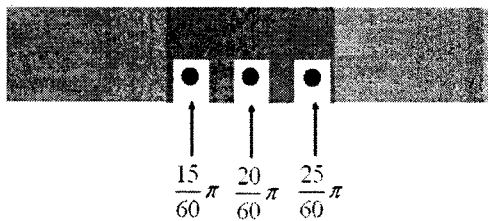


그림 3 적용할 수 있는 노치의 위치

디텐트력을 저감하기 위한 노치의 폭은 슬롯의 개구폭이 이상적이다. 하지만, 본 논문의 해석 모델의 개구폭이 치폭보다 크기 때문에 본 논문에서는 적용시킬 수가 없었다. 따라서, 본 논문에서는 노치의 폭과 깊이를 구하기 위하여 신경회로망을 통하여 노치의 폭과 깊이를 최적 설계 하였다[3]. 신경회로망 결과 설치되는 노치의 위치는 $(15/60)\pi$ 와 $(25/60)\pi$ 의 2군데 설치하였으며, 적용된 노치의 폭 및 깊이는 각각 1[mm], 1[mm]로 계산되었다.

2.1.2 영구자석 형상 변화

디텐트력의 저감을 위하여 본 논문에서는 영구자석의 형상을 변화시켰다. 특성 해석 기법으로는 전기기기의 특성해석으로 많이 이용되는 유한 요소법을 사용하였다. 유한요소법의 단점의 극복을 위하여 초기 모델링 데이터(절점, 선, 영역 등)를 이동시킨 후 요소분할을 통하여 각각의 설계변수 변화에 따른 전처리 데이터를 자동으로 생성하도록 하는 모델절점이동기법을 적용하였다.

그림 4는 본 논문에서 적용한 영구자석의 형상 변화에 대하여 나타내었다. 그림 4와 같이 영구자석의 단부

쪽에 라운드를 주는 형태로 영구자석의 형상을 최적화 하였다. 라운딩을 주는 이유는 구동 전원의 파형이 정현파이므로 영구자석의 자속형태를 정현파의 형태로 가져가기 위함이다.

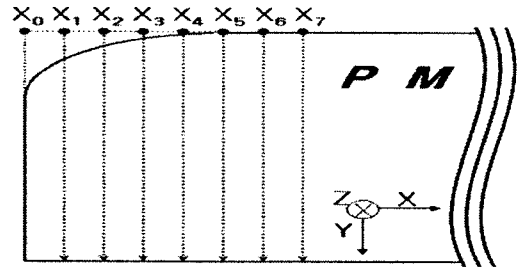


그림 4 영구자석의 형상 변화

영구자석의 형상 최적화는 신경회로망법을 이용하였다 [3]. 이때의 설계 파라미터로는 영구자석 Edge부분을 X_0 , 이 점으로부터 X-축 방향으로 0.5[mm] 간격으로 $X_0 \sim X_7$ 까지 선정하였다. 이 선정된 노드들은 모두 Y-축 방향으로만 이동이 가능하며 그 이동 간격은 0.01 [mm]이고, 이때 나타내는 X의 값들은 모드 Y-축 방향으로 이동 거리를 나타내고 이다. 모든 X는 항상 $X_0 \geq X_1 \geq X_2 \geq X_3 \geq X_4 \geq X_5 \geq X_6 \geq X_7$ 을 만족하여야 한다. 목적 함수로는 디텐트력 및 발생 추력으로 설정하였다.

최적화 수행결과, 형상변화 모델의 X_0 부터 X_2 까지의 각각의 값은 1.5[mm], 1.19[mm], 1.42[mm]이고, $X_3 \sim X_7$ 는 0[mm]로 선정되었다.

2.1.3 스큐의 적용

디텐트력의 저감을 위하여 영구자석에 스큐를 시행하였다. 영구자석의 스큐는 디텐트력을 크게 저감시킬 수 있으나, 발생 추력또한 감소시키는 영향을 주게된다.

그림 5는 영구자석의 스큐적용을 나타낸다.

본 논문에서는 극간격의 1/3의 크기인 10[mm]의 크기로 스큐를 적용하였다.

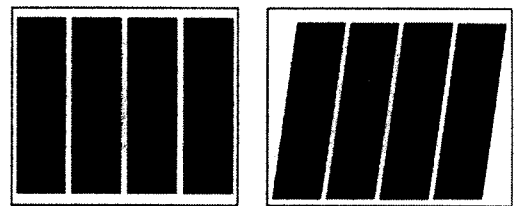


그림 5 스큐의 시행

2.3 영구자석 overhang 시행

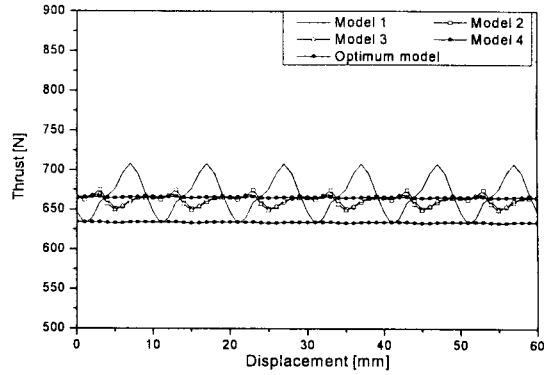
영구자석의 스큐 시행으로 인하여 감소한 발생 추력을 보상하기 위하여 영구자석에 overhang을 시행하였다. 추력 보상을 위한 overhang의 길이는 8[mm]로써 영구자석의 축방향 길이를 103[mm]로 선정하였다.

2.4 특성해석 결과 비교

그림 6은 유한요소해석을 통한 디텐트력, 정추력 및 정추력의 고조파 분석, 운전상태 특성을 비교한 것이다. 그림에서 Model 1은 기본모델, 모델 2는 기본모델에 노치만 적용한 모델, 모델 3은 기본모델에 노치와 영구자석 형상변화를 적용한 모델, 모델 4는 모델 3에 스큐까지 고려한 모델, 최적 모델은 4에서 추력의 감소분을 보완하기 위하여 영구자석에 overhang을 시행한 모델이다. 표 2에 특성해석 결과를 나타내었다.

디텐트력 결과에서 노치를 적용한 경우 모델 1의 32.1(%)로 크게 감소하였다. 형상변화까지 시킨 경우 10[N]으로 감소하였으나 이것의 감소분은 거의 매우 작았다. 그 원인은 모델 1의 영구자석의 폭이 26.5(mm)로 영구자석의 폭이 최적화 되어있는 상태에서 형상변화를 시도하였기 때문이다. 최적 모델의 디텐트력은 0.85[N]으로 모델 1의 2.2(%)였다.

정추력 결과 노치 및 영구자석의 형상변화로 인한 발생추력의 감소는 거의 없으나, 영구자석의 스큐의 시행으로 발생추력은 35.5[N]이 감소하였다. 이를 보완하기 위하여 영구자석에 overhang을 시행하였고 그 결과, 발생 추력은 모델 4와 비교하여 29.5[N]이 증가하였으며, 추력의 왜형률은 디텐트력의 증가로 인하여 1.6(%)에서 1.658(%)로 증가하였으나, 모델 1과 비교하면, 34.4(%) 크게 감소하였다.



(d) 정상상태 운전특성 (부하각 90°)

그림 6 특성 해석 결과 비교

부하각 90°인 경우 정상상태 운전특성의 리플율은 디텐트력 저감으로 인하여 기본 모델인 모델 1의 11.34(%)에서 0.25(%)로 크게 감소하였다.

표 2 특성해석 결과 비교

| Model | 1 | 2 | 3 | 4 | 최적 모델 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 디텐트력 [N] | 38.34 | 12.32 | 10 | 0.74 | 0.85 |
| 발생추력 [N] | 686.7 | 675.5 | 673.4 | 634.9 | 663.9 |
| 왜형률 (%) | 4.815 | 3.575 | 3.291 | 1.6 | 1.658 |
| 리플율 (%) | 11.34 | 3.62 | 3.03 | 0.23 | 0.25 |

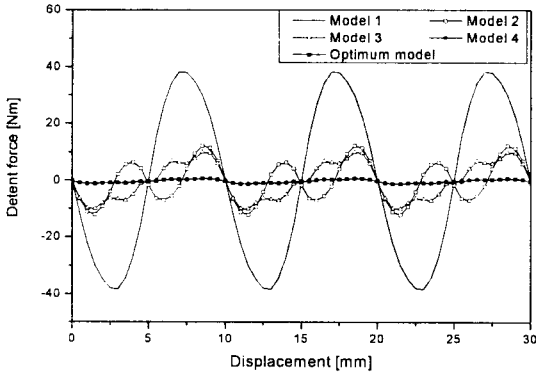
3. 결 론

본 논문에서는 단 1차형태의 슬롯형 PMLSM의 성능 향상을 위하여 슬롯형 PMLSM에서 필요적으로 발생하는 디텐트력을 저감시켰다. 디텐트력을 저감하기 위한 기법으로는 가동자의 치에 노치를 적용하고, 영구자석에 형상 변화 및 스큐를 시행하였다. 영구자석의 스큐의 시행으로 인하여 감소한 추력은 overhang을 통하여 보완하였다.

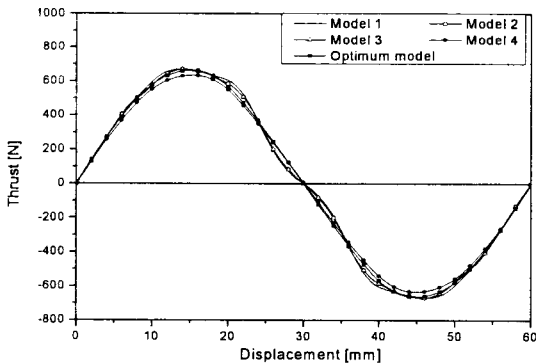
그 결과, 기본모델에 비하여 디텐트력은 38.34[N]에서 0.85[N]으로 98(%)가 크게 저감되었으며, 발생 추력은 669.7[N]에서 663.7[N]으로 다소 감소하였다. 하지만, 왜형률과 리플율이 4.815(%)에서 1.658(%)로, 11.34(%)에서 0.25(%)로 크게 감소하였다. 현재 시작기를 제작 중에 있으며, 제작 완료시 실험을 통하여 이 논문의 타당성을 입증하겠다.

[참 고 문 헌]

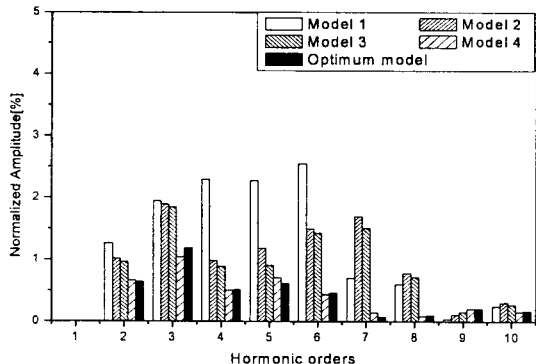
- [1] Ki-Chae Lim, Joon-keun Woo, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, "Detent force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 1157-160, 2002
- [2] 이동형, 김규탁, "PMLSM의 디텐트력 최소화를 위한 Notch의 적용에 관한 연구", 전기학회논문지, Vol. 54B, No. 10, pp. 477-482, 2005
- [3] Dong-Yeup Lee, Chun-Gil Jung, Kang-Jun Yoon, Gyu-Tak Kim, "A Study on the Efficiency Optimum Design of a Permanent Magnet Type Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 41, No. 5, pp. 1860-1863, 2005



(a) 디텐트력



(b) 추력 특성



(c) 정추력의 고조파 분석