

원통형 영구자석 선형 동기 전동기의 디텐트력 저감

이종진, 고창설, 천장성^{*}
충북대학교 전기공학과, '(주) 세우산전

Detent force reduction in a Cylindrical type PMLSM

Jong Jin Lee, Chang Seop Koh, Jang Sung Chun^{*}

Dept. of Electrical Eng. Chungbuk National University, 'Sewoo Industrial System co. Ltd'

Abstract - 원통형 선형 동기 전동기의 디텐트력을 고정자 안쪽의 치와 영구자석 사이에서 작용하는 힘과 고정자 바깥쪽의 치와 영구자석 사이에서 작용하는 힘의 합이며, 일반적으로 고정자 바깥쪽의 치와 영구자석 사이에서 작용하는 단부효과에 의한 힘이 훨씬 크다. 이 단부효과에 의한 힘을 줄이기 위한 방법으로 고정자의 길이 조정 및 챔퍼링이 있으며, 이를 통하여 원통형 선형 동기 고정자의 형상을 최적 설계한다.

정자 안쪽의 치와 영구자석에 의한 힘보다 훨씬 크다. 그럼 2에 고정자와 영구자석의 상대적인 위치에 따른 디텐트력과 단부효과에 의한 디텐트력, 전체 디텐트력을 나타내었다. 단부효과에 의한 디텐트력이 코깅토크에 대비되는 힘보다 3배 이상 크므로, 전체 디텐트력이 단부효과에 의한 디텐트력에 의해 좌우되는 것을 볼 수 있으며, 단부효과에 의한 디텐트력만 줄여도 전체 디텐트력을 현저하게 줄여들 것이라 생각된다.

1. 서 론

원통형 영구자석 선형 동기 전동기(Cylindrical type PMLSM)는 일반적인 평판형(flat-plate type) 선형전동기의 문제점인 고정자 코어(Stator Core)와 이동자(Mover)와의 수직 방향의 자기적인 인력(Magnetic attraction)을 상쇄시키는 구조를 갖고 있어 큰 가속운동에 유리하여 여러 분야에 적용이 가능하지만, 영구자석 채용 전동기 특성상 디텐트력(Detent force)이 발생하는 문제점을 안고 있다.[1]

디텐트력은 추력 맥동(Thrust ripple)의 원인이 되어 전동기의 성능을 저하시키므로 저감시켜야 하는 요소인데, 이는 두 가지 원인에 의해 발생한다. 하나는 고정자 안쪽의 치(teeth)와 영구자석 사이에서 작용하는, 회전기에서의 코깅토크(Cogging torque)에 대비되는 힘이고, 다른 하나는 고정자 바깥쪽의 치와 영구자석 사이에 작용하는, 단부효과(End effect)에 의한 힘이다. 일반적으로 두 번째 단부효과에 의한 힘이 첫 번째 코깅토크에 대비되는 힘보다 훨씬 크며, 이를 줄이기 위한 방법으로는 고정자의 길이 조정 및 챔퍼링(Chamfering)이 있다.[2][3]

따라서 본 논문에서는 2차원 축대칭 유한요소법(2D Axis-Symmetric FEM)을 이용하여 원통형 영구자석 선형 동기 전동기의 단부효과에 의해 발생하는 디텐트력을 저감시키는 고정자의 길이를 결정하고 형상을 설계하였다.

2. 기본모델

표 1과 그림 1에 기본모델의 제원 및 형상을 나타내었다. 단 1차형 영구자석 선형 동기 전동기 (Short stator PMLSM)의 디텐트력은 고정자 안쪽의 치와 영구자석에 의한 디텐트력과 고정자 바깥쪽의 치와 영구자석에 의한 디텐트력의 합인데, 고정자 안쪽의 치와 영구자석에 의한 디텐트력은 회전기의 코깅토크에 대비되는 힘으로, 극 간격(pole pitch)의 2배를 영구자석과 슬롯비의 최소 공배수로 나눈 값을 주기로 발생한다. 본 모델에서의 영구자석과 슬롯비는 2:3이므로 디텐트력은 극 간격의 2배, 30mm을 최소공배수 6으로 나눈 값 5mm를 주기로 발생한다. 고정자 바깥쪽의 치와 영구자석에 의한 디텐트력은 회전기에는 존재하지 않는 선형기 고유의 단부효과에 의한 힘으로 극 간격의 주기로 발생하고, 일반적으로 고

표 1. 원통형 영구자석 선형동기전동기의 제원
Table 1. Specification of Cylindrical PMLSM

구분	제원	
1차축(고정자)	상수	3
	슬롯폭	7(mm)
	슬롯간격	10(mm)
	극간격(r_p)	15(mm)
	두께	3.1(mm)
	폭	10(mm)
2차축(영구자석)	재질	NdFeB
	잔류자속밀도	1.23(T)
공극	기계적 공극	0.6(mm)

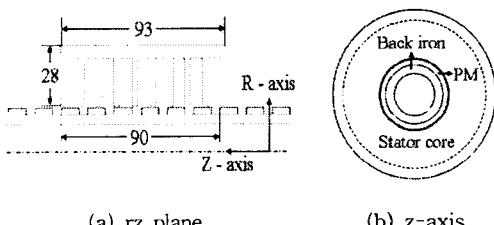


그림 1. 기본모델
Fig. 1. Based model

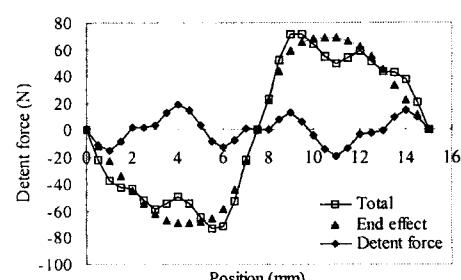


그림 2. 기본모델의 디텐트력 특성
Fig. 2. Detent force characteristics of based model

3. 양 단부에서의 디텐트력

단부효과에 의한 디텐트력을 해석하기 위해 고정자 코어의 슬롯을 없앤 모양으로 형상을 설계하여, 그림 3에 왼쪽 단부에 의한 디텐트력과 오른쪽 단부에 의한 디텐트력 해석을 위한 해석모델을 나타내었고, 2D FEM에 의한 결과를 그림 4에 나타내었다. 여기서 Position z 는 그림 3에서처럼 이동자가 영구자석의 중간에 위치했을 때가 0이고, $+z$ 축 방향으로 이동자가 길어지거나 또는 짧아지는 값이다.

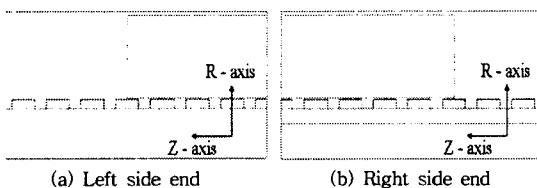


그림 3. 양 단부에 의한 디텐트력 해석 모델

Fig. 3. Detent force analysis model due to both end sides

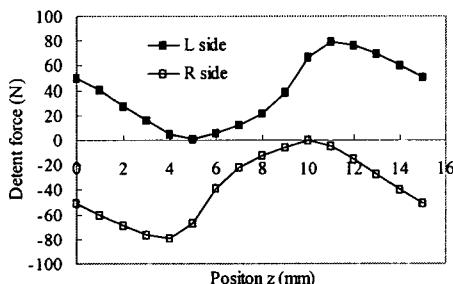


그림 4. 양 단부에 의한 디텐트력 해석 결과

Fig. 4. Detent force due to both end sides

4. 단부효과에 의해 발생하는 디텐트력 저감

4.1 고정자의 길이 조정에 의한 디텐트력 저감

양단부에 의한 디텐트력은 그림 4의 왼쪽 단부에 의한 디텐트력과 오른쪽 단부에 의한 디텐트력의 합이므로 고정자의 길이를 조정하여 두 디텐트력 함수의 위상을 적절히 조절하면 디텐트력을 저감할 수 있다.

왼쪽 단부에 의한 이동자의 위치 z (mm)에 따른 디텐트력을 함수 $f(z)$ 라 하고, 오른쪽 단부에 의한 디텐트력을 함수 $g(z)$ 라 하면 $g(z)$ 는 식 (1)과 같이 표시될 수 있다.

$$g(z) = -f(\tau_p - z) \quad (1)$$

양 단부에 의한 디텐트력은 $f(z)$ 와 $g(z)$ 의 합이므로 $g(z)$ 를 적절히 이동(Shift)시켜 위상에 변화를 주면 디텐트력을 상쇄시킬 수 있으며, 식 (2)는 $g(z)$ 를 $+z$ 축 방향으로 t (mm)만큼 이동시켰을 때의 총 디텐트력을 나타낸다.

$$\text{Total detent force} = f(z) - f(\tau_p - z + t) \quad (2)$$

고정자의 길이를 조정하는 것은 $f(z)$ 와 $g(z)$ 의 위상 차를 주는 것과 같으므로 그림 4의 FEM에 의해 얻은 Data 값을 Spline한 함수 $f(z)$ 를 이용하여 t 를 3mm에서 15mm까지 변화시켰을 때의 고정자의 위치에 따른 디텐트력 계산값을 그림 5(a)에 나타내었고, 그때의 최대 디

텐트력의 변화를 그림 5(b)에 t 를 고정자의 길이로 변환하여 나타내었다. 여기서 최대 디텐트력은 디텐트력의 최고점과 최저점의 차이로 정의하였다. t 가 증가함에 따라 최대 디텐트력이 작아지다가 어느 순간 다시 커지는 것을 볼 수 있는데, $f(x)$ 가 좌우대칭인 함수라면 이론적으로 t 가 극 간격에서 최대 디텐트력이 최소가 되겠지만, 영구자석의 폭 길이 및 영구자석 간격 등, 모델의 기하학적인 상태에 따라 $f(x)$ 의 형태가 그림 4에 보이듯이 대칭이 되지 않기 때문에 항상 t 가 극 간격에서 최대 디텐트력이 최소가 되지는 않고, 본 모델에서의 계산결과는 고정자의 길이가 99.4mm($t=9.4\text{mm}$)에서 최소값 25.5(N)을 가진다. FEM 해석 결과 고정자의 길이가 99.2mm($t=9.2\text{mm}$)에서 최소값 28(N)을 가지므로 이 고정자 길이의 모델을 최적화 모델로 정하였다. 그림 6은 기본모델과 고정자 길이가 최적화된 모델의 디텐트력 비교를 나타낸다. 최대 디텐트력은 기본모델의 137(N)에서 고정자 길이 최적화된 모델의 28(N)으로 변화하였으며, 처음값의 20%로 저감되었다.

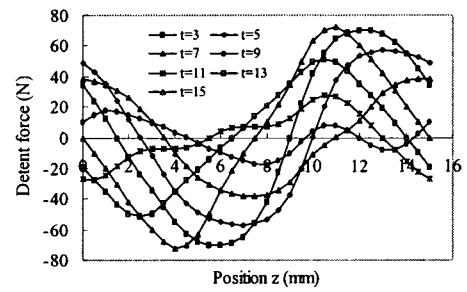


Fig. 5(a). Detent force Vs. mover position

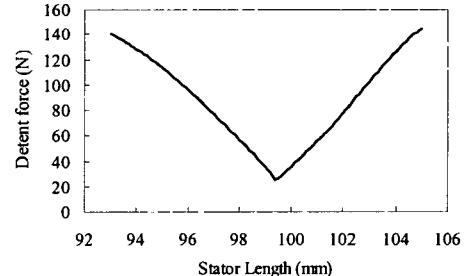


Fig. 5(b). Maximum detent force Vs. stator length

그림 5. 함수 이동에 의한 계산 결과

Fig. 5. Calculate results according to function shift

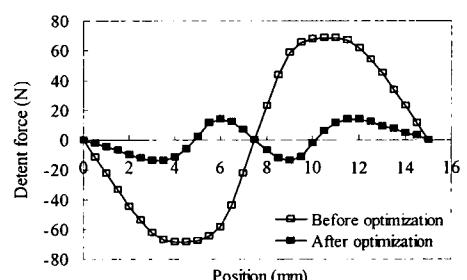


그림 6. 고정자 길이 최적화 전후의 디텐트력 비교

Fig. 6. Detent force comparison between before and after optimization

4.2 챔퍼링에 의한 디텐트력 저감

고정자 양단에서 영구자석과의 자기적인 인력에 의해 디텐트력이 발생하므로 양단에 챔퍼링을 하여 부드러운면(Smooth formed edge)으로 설계하면 자속의 변화가 급격하지 않아 디텐트력이 저감된다. 그림 7(a)는 고정자 양단에 챔퍼링을 주기 위하여 고정자 길이 최적화 모델을 두 배의 극 간격만큼 길게 한 모델을 나타내며, 그림 7(b)는 설계변수 x_1, x_2 의 챔퍼링 모델을 나타낸다. 그림 8은 설계변수 x_1, x_2 변화에 따른 최대 디텐트력의 FEM 해석 결과이며, 여기서 최대 디텐트력은 앞서와 마찬가지로 디텐트력의 최고점과 최저점의 차이로 정의하였다. 최대 디텐트력은 x_1 이 $\tau_e/2$ 간격에서 최소이고, x_2 가 1.5mm 근처에서 최소값을 갖다가 이를 넘어서면 오히려 증가하는 양상을 보인다. $x_1=15\text{mm}$, $x_2=1.5\text{mm}$ 일 때 최대 디텐트력이 최소가 되며, 그림 9는 챔퍼링 최적화 전후의 디텐트력 비교를 나타낸다. 최대 디텐트력은 챔퍼링 전의 초기 모델의 28(N)에서 챔퍼링 최적화 모델의 8(N)로 변화했으며, 챔퍼링을 함으로써 29%로 저감되었다.

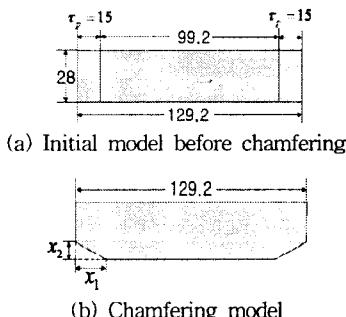


그림 7. 챔퍼링 전후의 모델

Fig. 7. Chamfering model

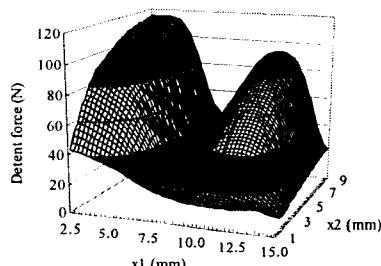


그림 8. 설계변수(x_1, x_2) 변화에 따른 디텐트력

Fig. 8. Detent force with respect to variation of x_1, x_2

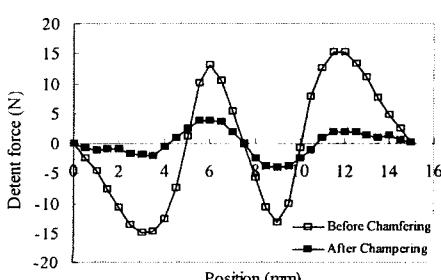


그림 9. 챔퍼링 전후의 디텐트력 비교

Fig. 9. Detent force comparison between before and after chamfering

4.3 최종 최적화 모델

그림 10은 설계변수 $x_1=15\text{mm}, x_2=1.5\text{mm}$ 의 양 단부가 최적화된 모델을 나타내며, 그림 11에 고정자와 영구자석의 상대적인 위치에 따른 초기 기본모델에서의 단부효과에 의한 디텐트력, 고정자 길이 최적화 모델에서의 단부효과에 의한 디텐트력, 고정자 길이 및 챔퍼링 최적화 모델에서의 단부효과에 의한 디텐트력 특성을 나타내었다. 최종 고정자 길이 및 챔퍼링 최적화된 모델에서의 단부효과에 의한 최대 디텐트력은 8(N)으로 초기 기본모델에서의 최대 디텐트력 137(N)의 6%이다.

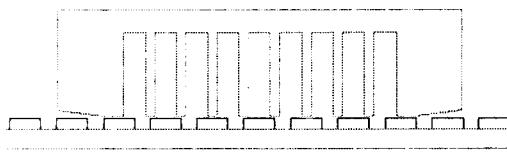


그림 10. 양 단부가 최적화된 모델

Fig. 10. Optimized model of both end sides

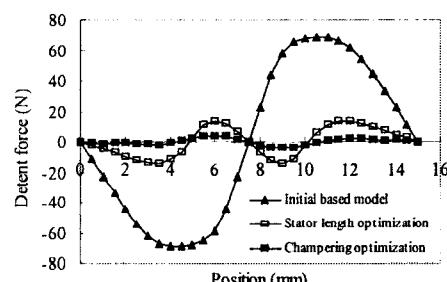


그림 11. 단부효과에 의한 디텐트력 특성

Fig. 11. Detent force due to end effect

5. 결 론

본 논문에서는 원통형 선형 동기 전동기에 대하여 디텐트력을 해석하고, 고정자의 길이 조정 및 챔퍼링을 통하여 단부효과에 의해 발생하는 디텐트력을 저감하였으며, 이는 합수이동계산 방법과 FEM을 사용하였다. 합수이동계산 방법은 정확한 데이터만 있으면 비교적 짧은 시간에 결과를 얻을 수 있으며, 그 결과의 정확성 또한 유한요소법과 거의 같음을 확인하였다. 초기 기본모델의 단부효과에 의한 최대 디텐트력을 고정자의 길이 조정에 의해 20%로 저감하였으며, 이에 챔퍼링 효과를 더하여 6%까지 저감시켰다. 추후 고정자 양쪽의 치와 영구자석에 의해 발생하는 디텐트력을 저감하여 전체 디텐트력을 최소화해야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kazuhiro Makiuchi, "Driving Characteristics of Cylindrical Linear Synchronous Motor", Sanyo Denki Technical Report No.8 November, 1999
- [1] 최호용, "제작성을 고려한 철심형 선형 전동기의 디텐트력 저감", 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집, pp. 30 - 32, 2002. 11
- [2] Masaya Inoue, "An Approach to a Suitable Stator Length for Minimizing the Detent Force of Permanent Magnet Linear Synchronous Motors", IEEE Transactions On Magnetics, vol.36, no. 4, pp. 1890 - 1893, 2000. 7