

영구자석 선형 동기전동기(PMLSM)의 디텐트력 저감을 위한 자기회로 설계

하재평, 김영균, 홍정표, 강규홍, *조한익, **하경호,
 창원대학교 전기공학과, *(주)OTIS-LG, **(주)POSCO.

Design for Detent Force Reduction in Permanent Magnet Linear Synchronous Motors

Jae-Pyeong Ha, Young-Gyun Kim, Jung-Pyo Hong, Gyu-Hong Kang, *Han-Ik Jo, **Kyeong-Ho Ha,
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University,
 *OTIS-LG Co.,LTD, **POSCO Co.,LTD

Abstract - Detent force produced in permanent linear machines generally causes an undesired effect that contributes to the output ripple of machine, vibration and noise. This paper analyzes detent force and thrust in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM) by using various detent force minimization techniques. A two dimensional Finite Element Analysis(FEA) is used to predict detent force and thrust due to structural factors and non-linearity.

1. 서 론

최근 직선추력이 요구되는 시스템에서 회전형 전동기를 포함하는 동력전달 메카니즘은 점차 선형전동기로 대체되고 있다. 선형전동기는 일반 회전형 전동기에 비해 전동기 자체의 효율이 낮고 역률이 떨어지는 등의 단점을 가지지만, 직접 직선추력을 발생시킴으로 인해 동력 변환 시스템에서 발생하는 문제점을 근본적으로 해결할 수 있어 리니어 시스템의 전체적인 효율 향상 및 성능 향상을 기대할 수 있다.

현재 선형전동기는 많은 연구가 진행되어 그 응용분야가 산업전반에 확대되고 있다. 이 중에서 영구자석 선형 동기전동기(PMLSM)는 기존의 코일을 이용한 동기전동기에서 제자원을 영구자석으로 대체한 형태의 선형전동기로 비교적 효율 및 추력/중량비가 높아서 고 추력화, 고속화가 가능한 이점이 있다.[1]

PMLSM은 기본적으로 회전형 동기전동기와 구조 및 구동원리가 동일하나 상대적으로 큰 공극을 가지며 회전을 펼쳐놓은 유한한 길이를 가진다. 따라서 회전기에서는 존재하지 않는 수직력 및 단부효과가 존재하므로 설계시 이들에 대한 고려가 이루어져야한다.

또한 PMLSM과 같은 영구자석 기기에서는 영구자석과 슬롯의 상대적인 위치변화에 따라 발생하는 디텐트력(detent force)이 발생한다. 디텐트력은 전동기 구동시 발생 추력(thrust)의 맥동으로 작용하여 기기의 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라, 기기의 제어성능 저하를 가져오며 특히 정지상태에서의 정밀 위치제어를 어렵게 하는 요인으로 작용한다.[2] 따라서 PMLSM의 성능향상을 위해서는 디텐트력에 대한 정밀한 해석을 통한 이의 저감이 필요하다.

본 논문에서는 양측식(Double-sided) PMLSM를 기본모델로 하여 디텐트력 저감 설계를 수행하였다. 양측식 PMLSM의 디텐트력을 저감하기 위한 방법으로 가동자의 양 끝단에 보조극을 취하고 보조극의 재질 및 형상을 변화시키는 방법을 사용하였다. 각 변수에 따른 모델의 특성해석은 유한요소법(FEM)을 이용하여 재질의 비선형성과 국부적인 포화를 고려하도록 하였다.

2. 해석 모델

2.1 기본모델의 구조 및 특징

양측식 PMLSM은 영구자석이 부착된 2차측 가동자와, 전원이 인가되는 1차측 고정자가 가동자의 양쪽으로 위치하는 단 2차(Short-secondary) 구조를 갖는다. 양측식 PMLSM의 자기회로 구조 및 단면도를 그림 1 과 그림 2에 각각 나타내었다.

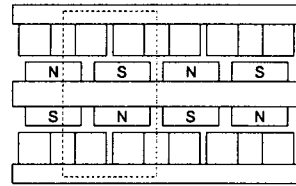


그림 1. 양측식 PMLSM의 자기회로의 구조

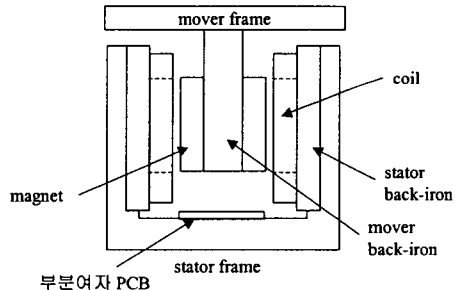


그림 2. 양측식 PMLSM의 단면도

2.2 해석모델

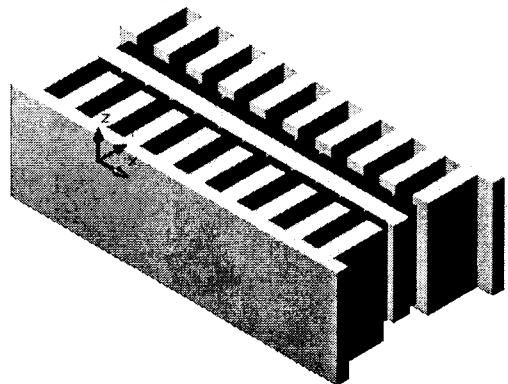


그림 3 기본모델의 전체 형상

양축식 PMLSM의 전체형상을 그림3에 나타내었다. 해석모델은 가동자가 유한한 길이를 가짐으로 인해 발생하는 단부효과(end effect)를 고려하기 위해 해석영역을 전제모델로 하였으며, 그림에서 보듯이 양축이 대칭이기 때문에 한 쪽만을 해석모델로 하여 해석결과에 반영하였다. 양축식 PMLSM의 제원은 표 1과 같다.

표 1 양축식 PMLSM의 제원

구분	항목	기호	값(단위)
고정자 (1차축)	상수	m	3
	슬롯수	S_n	9
	코일당 권선수	N	595
	정격전류	I	5 (A _{rms})
	슬롯 피치	τ_s	20 (mm)
가동자 (영구자석)	슬롯폭	w_s	11.22 (mm)
	영구자석 폭	w_{pm}	12.5 (mm)
	영구자석 높이	h	7.5 (mm)
	영구자석 재질		Nd-Sintered
	잔류자속밀도@25°	B_r	1.33 (T)
공극	영구자석 스퀘		4슬롯피치 (mm)
	기계적 공극	g_m	1.2 (mm)

3. 양축식 PMLSM의 디텐트력 저감설계

직선기에서 디텐트력은 회전기의 코깅토크와 동일한 특성으로 영구자석과 슬롯구조에 의해 공극 고조파 성분의 증가로 발생한다. 본 논문에서는 양축식 PMLSM의 기본모델을 대상으로 가동자의 끝단에 보조극을 채용하고 보조극의 재질과 형상을 설계변수로 하여 디텐트력 저감설계를 수행하였다.

먼저 보조극의 재질에 따른 PMLSM의 디텐트력 특성을 살펴보고, 선택된 재질에 대해 치수변화를 설계변수로 하여 디텐트력 저감설계를 수행하였다.

3.1 보조극의 재질에 따른 디텐트력 특성

보조극에 따른 PMLSM의 특성을 보기 위해 먼저 기본모델의 가동자 끝단에 주자극과 동일한 크기의 보조극을 두고, 보조극을 철심 재질 및 기본모델의 영구자석과 동일재질을 주었을 때 각 모델의 특성을 비교해 보았다.

그림 4는 보조극의 재질에 따른 각 모델의 추력 특성을 비교한 그래프이다. 보조극 모델이 기본 모델보다 추력리플이 더 작고 추력의 평균값도 약간 증가하였음을 볼 수 있다.

그림 5는 기본모델과 보조극 모델의 디텐트력 특성을 비교한 것이다. 철심 보조극을 채용함으로써 디텐트력을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

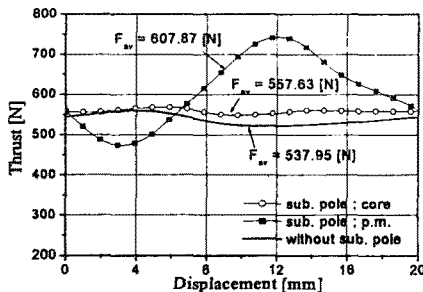


그림 4 보조극의 재질에 따른 추력 특성 (상전류: 2.5[A], $B_{r@70} = 1.265(T)$)

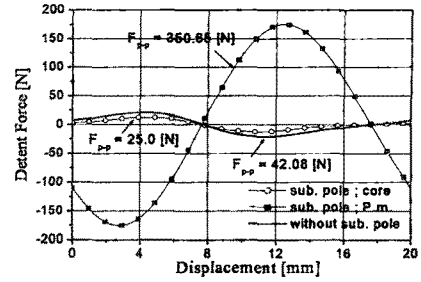


그림 5 보조극의 재질에 따른 디텐트력 특성 ($B_{r@25} = 1.33(T)$)

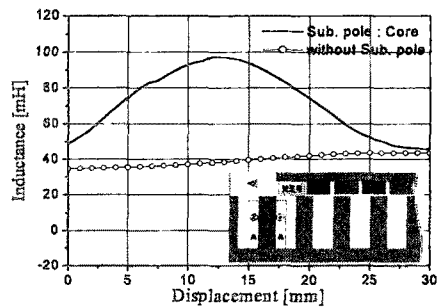


그림 6 가동자 변위에 따른 상당 인덕턴스 변화 (상전류: 2.5[A])

그림 6은 가동자의 위치 이동에 따른 인덕턴스의 변화를 나타낸 것으로 보조극이 없는 경우는 상 인덕턴스의 크기가 일정하지만, 철심 보조극을 사용한 경우는 가동자와 고정자의 코일이 중첩되기 시작하면서 인덕턴스가 증가하고 가동자의 철심 보조극의 하단에 고정자의 코일이 놓이는 경우 상 인덕턴스는 최대값을 가지게 된다. 이는 보조극이 있는 경우 보조극의 자성체가 자로의 경로 역할을 함으로써 인덕턴스를 증가시키기 때문이다. 따라서 철심 보조극을 사용할 경우는 보조극이 없는 경우보다 동일한 추력을 발생하면서 추력리플을 크게 감소시키지만 인덕턴스의 증가로 인해 제어 측면에서 보조극이 없는 경우에 비해 매우 불리할 것이다.

3.2 영구자석 보조극을 이용한 디텐트력 저감설계

영구자석 보조극을 사용한 경우는 보조극이 없는 경우에 비해 인덕턴스가 다소 감소하지만 인덕턴스의 변화가 적으므로 상대적으로 제어가 용이하다. 따라서 기본모델의 디텐트력을 저감하기 위하여 영구자석 보조극을 이용한 해석을 수행하였다.

영구자석 보조극은 주자극과 동일한 Nd-Sintered를 사용하며, 그림 7과 표 2에 영구자석 보조극을 이용한 디텐트력 저감설계를 위한 세부설계 변수와 각 변수에 대한 설명을 나타내었다. 표 3에는 세부설계 변수에 따른 각 모델의 해석조건을 나타내었다.

표 2 세부 설계 변수

세부설계 파라미터	설명
x_1	보조극의 폭
x_2	보조극의 높이
x_3	보조극과 인접극과의 이격

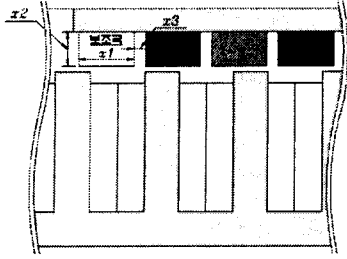


그림 7 세부 설계를 위한 변수 설정

표 3 설계변수에 따른 각 모델의 해석 조건

모델의 정의	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	기타
AP01	1.25	7.5	2.5	단부/스큐 고려
AP02	2.5	"	"	"
AP03	3.75	"	"	"
AP04	5	"	"	"
AP05	6.25	"	"	"
AP06	7.5	"	"	"
AP07	6.25	6.75	"	"
AP08	"	6.00	"	"
AP09	"	5.25	"	"
AP10	5.0	6.0	"	"
AP11	5.0	5.25	"	"
AP12	6.25	3.75	"	"
AP13	"	3.0	"	"
AP14	"	3.75	3.5	"
AP15	"	3.75	4.5	"

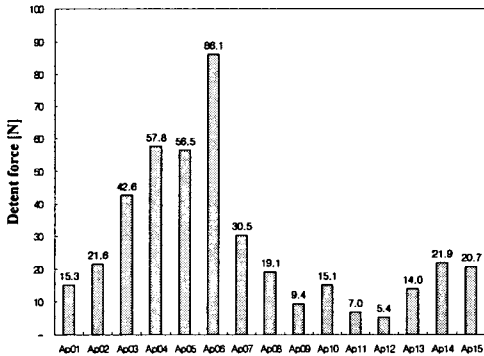


그림 8 영구자석 보조극에 따른 디텐트력 결과 비교

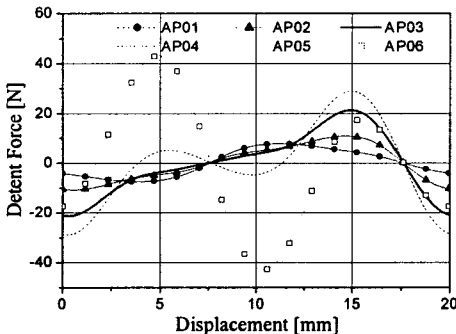


그림 9 각 모델에 따른 디텐트력 비교 I
($Br_{\theta 25} = 1.33(T)$, skew: 5.0(mm))

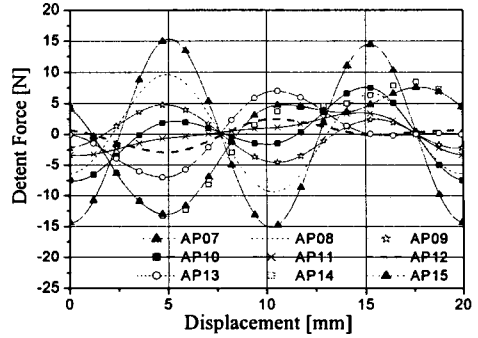


그림 10 각 모델에 따른 디텐트력 비교 II
($Br_{\theta 25} = 1.33(T)$, skew: 5.0(mm))

그림 8은 영구자석 보조극을 사용한 경우 단부효과 및 스큐를 고려한 각 설계변수에 따른 디텐트력 결과를 비교한 그래프이다. 각 설계 변수에 따른 디텐트력은 AP12 모델일 때 5.4(N)으로 가장 적었다.

그림 9와 그림 10은 가동자의 이동변위에 따른 각 모델의 디텐트력 변화 그래프이다.

설계변수에 따른 각 모델의 추력특성은 영구자석 보조극에 의한 공극자속량의 증가로 인해 보조극의 크기에 비례하여 증가함을 볼 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 양측식 PMLSM을 기본모델로 하여 디텐트력 저감설계를 수행하였다. 디텐트력을 저감하기 위한 방법으로 가동자의 양 끝단에 보조극을 두는 방법을 사용하였다.

보조극의 재질은 인덕턴스의 크기와 변화가 상대적으로 적은 영구자석 보조극을 이용하여 디텐트력 저감설계를 수행하였고, 보조극의 폭과 높이 그리고 주자극과의 이격거리를 설계변수로 하여 양측식 PMLSM의 특성해석을 유한요소해석을 이용하여 수행하였다.

영구자석 보조극의 설계변수에 따른 디텐트력은 그 폭이 넓을수록 증가하며, 동일한 폭에 대해서 높이가 3.75(mm)까지는 줄어들수록 감소하였다. 그리고 보조극과 인접극과의 이격거리는 극간격과 동일한 2.5(mm)일때가 좋음을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 山田, "리니어 모우터 응용 핸드북", 世和, 1998
- [2] H. J. Kim et al., "The Basic Characteristics of the Vertical Linear Synchronous Motor for a Ropeless Elevator", *proceedings of ISEM*, pp.35-38, 1996.
- [3] Y. Yoshimura, J. J. Kim, Watada, S. Torii, D. Ebihara, "Analysis of the Reduction of Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp.3737-3739, 1995.
- [4] 임기채 외 3인, "영구자석 선형동기전동기의 디텐트력 최소화 기법 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, PP.763-765, 2000.
- [5] 임기채 외 2인, "슬롯효과를 고려한 영구자석 선형 동기전동기의 특성해석", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.32-36, 1998.