

보조치 형상 변화에 따른 영구자석 선형 동기 전동기의 단부 코깅력 고찰

김용재\*, 김성진\*, 이규명\*, 조경필\*, 조금배\*  
 조선대학교\*

Analysis of the Outlet Edge Cogging Force of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor by Deforming the Shape of Auxiliary Teeth

Yong-Jae Kim\*, Sung-Jin Kim\*, Kyu-Myung Lee\*, Kyoung-Pil Cho\*, Geum-Bae Cho\*  
 Chosun University\*

**Abstract** - 영구자석 선형 동기 전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)는 구조적으로 간단하며 고속화 고추력화 등의 많은 장점을 가지고 있지만 전기자 권선부의 슬롯-치 구조로 인한 코깅력과 단부효과에 의한 코깅력이 발생한다. 이는 추력 맥동의 원인이 되며, 소음과 진동을 발생시킨다. 따라서, 본 연구에서는 전기자를 분산배치할 경우 필연적으로 생기는 단부에 의한 코깅력을 저감하기 위해 기존의 전기자 끝단에 설치한 보조치를 응용하여 계단형 형상을 가진 보조치의 설치를 제안하였다.

1. 서 론

현재 PMLSM은 주로 단거리 반송장치의 구동원으로 적용되고 있으나 장거리용 고하중 반송장치의 필요성이 꾸준히 증가되고 있다[1]. 장거리용 PMLSM은 추진장계를 발생시키는 전기자를 반송경로 전장에 설치해야 하기 때문에 반송경로가 길어지면 길어질수록 초기 코스트가 상승하는 문제점이 발생한다. 이러한 초기 코스트 상승의 문제점을 해결하기 위해 분산배치 방식의 전기자가 제시되고 있다. 그림 1에 전기자 분산배치 방식의 PMLSM을 나타내었다. 하지만, 분산배치 방식의 전기자는 구조상 반드시 단부(Outlet Edge)가 존재한다. 이러한 단부에 의해 가동자가 전기자에 진입 또는 반출시에 코깅력(Cogging Force)은 크게 발생하게 된다. 코깅력은 추력 맥동의 원인이 되어 기기의 소음과 진동을 발생시키고, 성능을 저감시키는 요소이다[2,3]. 코깅력을 저감하려는 방법으로 영구자석의 폭 조정, 영구자석의 스큐, 슬롯 폭 조정 또는 치 폭 조정, 반폐 슬롯 및 보조구 설치 등 현재 많은 연구가 진행되고 있다[4,5,6].

본 논문에서는 단부 코깅력을 줄이기 위하여 전기자 끝단에 설치한 기존의 보조치 형태를 계단모양의 형상으로 변형시켜 단부 코깅력을 저감시키고자 한다. 또한, 유한요소법을 이용한 2차원 수치해석을 통해 기본 모델의 단부 코깅력과 계단모양의 보조치의 형태를 갖는 제안 모델의 단부 코깅력을 비교하고 단부 코깅력이 최소가 되는 보조치를 설계한다.

2. 전기자 분산배치 PMLSM의 단부 코깅력 저감 설계

2.1 단부 코깅력

전기자 불연속 배치 PMLSM은 가동자가 전기자 설치부와 비설치부의 경계를 통과할 때에, 전기자 축 중심과 가동자 영구자석 사이에서 발생하는 흡인력이 크게 변동한다. 그림 2에 단부에서 발생하는 힘이 가동자에 미치는 영향에 대하여 나타낸다. 가동자가 전기자에 진입하는 진입부에서 발생하는 흡인력은 가동자의 진행 방향과 같은 방향의 힘으로서, 즉 가동자를 전기자 축으로 끌어 들이는 힘으로 작용하여 가동자를 가속시킨다. 또한, 가동자가 전기자를 벗어나는 반출부에서 발생하는 흡인력은 가동자의 진행 방향과 역방향의 힘으로서, 즉 가동자를 전기자 축에 되돌리는 힘으로 작용하여 가동자를 감속시킨다. 그러므로 이러한 단부 코깅력을 감소시켜야 한다.

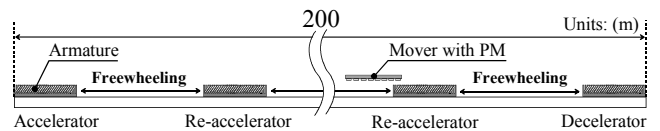
2.2 전기자 분산배치 PMLSM 사양

표 1에 전기자 분산배치 PMLSM의 사양을 나타낸다. 전기자 분산배치 PMLSM의 가동자는 총길이 135[mm]로, Nd-Fe-B타입 영구자석 4극을 자로강판에 배치하였다. 영구자석 길이는 25[mm], 극 간격은 30[mm]이다. 또한, 전기자의 길이는 175[mm]이고 권선법은 분포권으로서 한상당 코일 수는 100[turns]이다. 슬롯 간격은 10[mm]이며 17슬롯으로 구성한다.

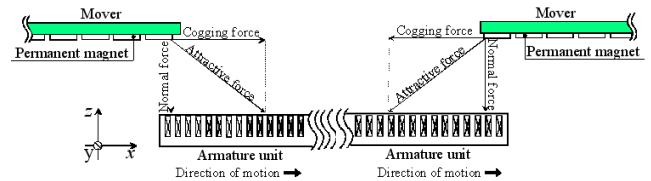
2.3 PMLSM의 단부 코깅력 저감 설계

2.3.1 기본 모델 해석

그림 3에 기본 모델을 나타내었다. 전기자와 가동자의 공극을 5[mm]로 하고, 이 때의 요소수는 61200, 절점수는 31314이며, 1Step당 0.5[mm]



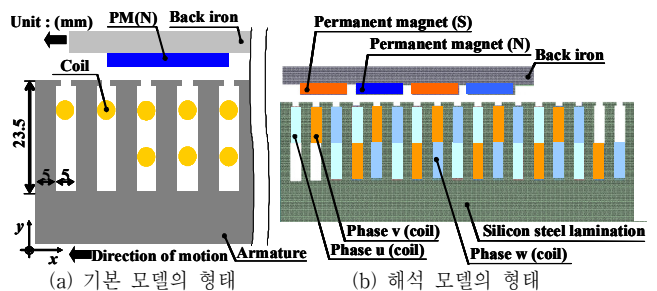
〈그림 1〉 전기자 분산배치 방식의 PMLSM



〈그림 2〉 전기자의 단부가 가동자에 미치는 영향

〈표 1〉 PMLSM의 사양

		Items	Value
Mover (Permanent Magnet)		Pole	4[Pole]
		Height of PM	3[mm]
		Length of PM	25[mm]
		Pole pitch	30[mm]
Armature		Turns per Phase	100[turns]
		Slot pitch	10[mm]
		Width of teeth	5[mm]
		Height of teeth	23.5[mm]
Mechanical air-gap			5[mm]

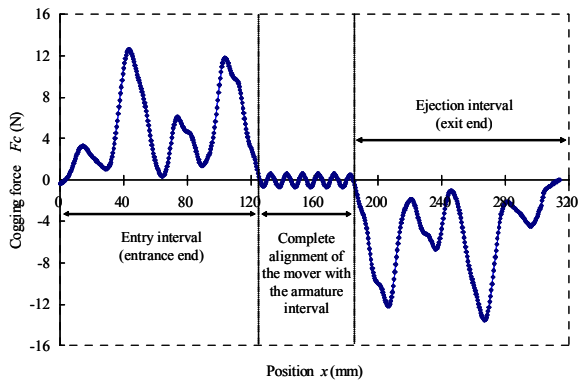


〈그림 3〉 기본 모델

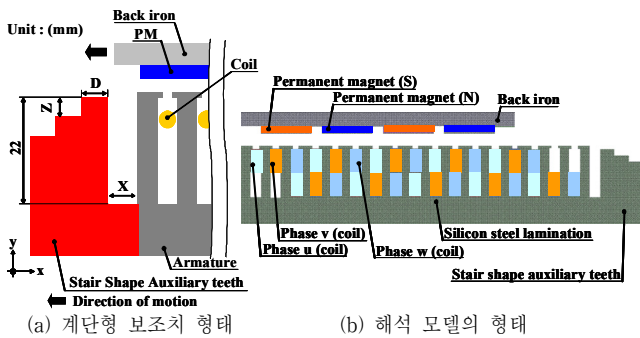
이동하도록 설정 하였다. 그림 4에 기본 모델의 단부 코깅력을 나타낸다. 가동자가 전기자에 진입 및 반출하는 부분에서 발생하는 최대 단부 코깅력은 13.41[N]이고, 가동자와 전기자가 완전하게 대향하고 있는 부분에서 발생하는 최대 코깅력은 0.6[N]이다.

2.3.2 계단형 보조치를 이용한 제안 모델

그림 5에 단부코깅력을 저감하기 위해 제안한 계단형 보조치의 형태를 나타낸다. 계단형 보조치를 설계할 경우, 그림 5에 나타난 설계변수 X, Y, D를 선정할 필요가 있다. 이에 우리는 설계변수 Y, D를 각각 22[mm], 7.5[mm]로 고정하고 계단형 보조치의 설계변수 X를 조절하여 연구를 수행하였다[7]. 그 결과 X피치를 7.5[mm]로 할 경우, 최대 단부코깅력이 22.12[%] 저감됨이 판명되었다. 본 연구에서는 설계변수 Z의 조정에 의하여 발생하는 단부코깅력을 고찰한다. Z의 설계 변수는 1.5~



〈그림 4〉 기본 모델의 단부 코깅력



〈그림 5〉 계단형 보조치를 설치한 모델

4.5[mm]로 조정하고 계단의 단수는 3단으로 설정하였다. 이때 X피치 및 D폭은 7.5[mm]로 고정하였다. 그림 6에 설계변수 Z길이 조절에 따른 계단형 보조치의 모델을 나타내었다. 그림 7에 설계변수 Z길이 조절에 따른 계단형 보조치의 모델의 단부 코깅력 비교를 나타내었다. 기본모델의 최대 단부 코깅력은 13.41[N]이며, 보조치 제안모델의 최대 단부 코깅력은 10.40[N]이다. 계단 모양의 보조치를 제안한 모델 중 단부 코깅력의 크기가 가장 저감된 모델은 제안 모델#4로 최대 단부 코깅력은 7.60[N]이 발생하였다. 기존에 제안한 보조치를 사용할 경우의 모델보다 단부에서 발생하는 코깅력의 크기가 크게 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

### 3. 결 론

본 연구 수행에 앞서, 기존의 보조치 형태의 최적 모델의 값을 통하여 계단형 보조치의 설계 변수 X를 최적화하였다. 본 연구에서는 최적화한 X를 제약하고 Z를 설계변수로 선정하고 발생하는 단부 코깅력을 유한 요소법을 이용한 2차원 수치해석을 통해 해석하였다.

그 결과 Z=4[mm]일 때 기본 모델 대비 43.33[%], 보조치 모델 대비 26.92[%] 수준으로 저감되어 큰 폭의 단부 코깅력의 개선 효과를 얻을 수 있었다.

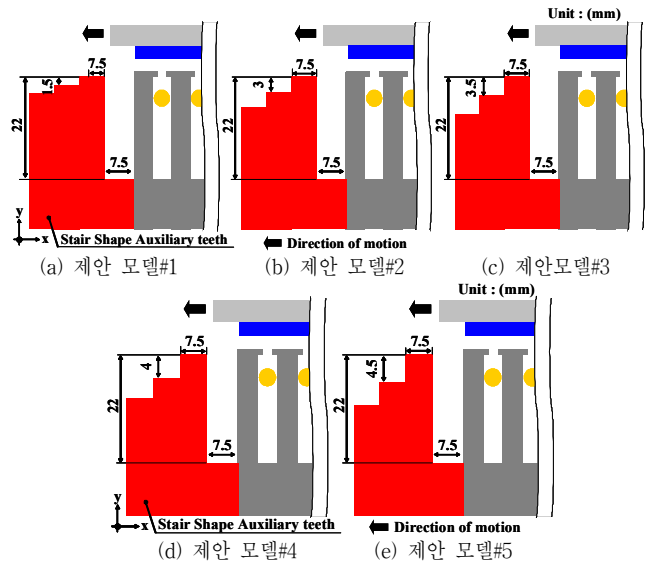
또한 계단형 보조치의 최적 설계를 위해서 이번 연구에서 가장 많은 단부 코깅력의 저감을 보인 X=7.5[mm], Z=4[mm]를 제약조건으로 선정하고, D의 설계에 대한 연구를 계속해서 진행해 나갈 것이다.

#### <감사의 글>

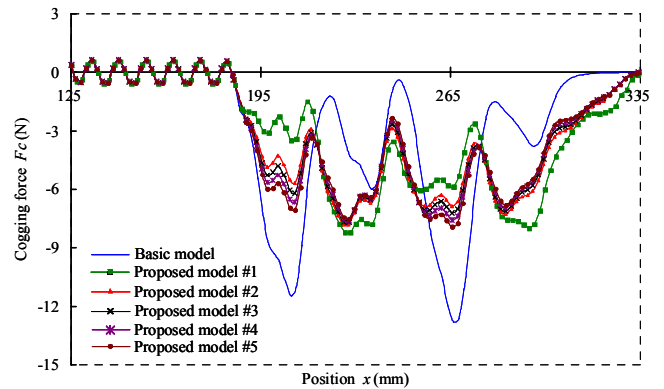
본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2011-0005388)

#### [참 고 문 헌]

[1] M. Karita, "Present Status of Linear Drives for Industry Applications in Japan", Proc. IEEJ conf. Linear Drives for industry applications, pp. 462-467, 2001.  
 [2] K. G. Lim, "Detent force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magnetics, pp. 1157-1160, 2002.  
 [3] L. S. Jung, "Analysis of forces in a short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor", IEEE Trans. Energy Conversion, pp. 1365-1270, 1999.



〈그림 6〉 설계 변수 Z길이 조절에 따른 계단형 보조치의 모델



〈그림 7〉 설계 변수 Z에 따른 계단형 보조치의 모델의 단부 코깅력 비교

〈표 2〉 모델에 따른 단부 코깅력 특성 비교

	최대 단부코깅력	기본 모델 대비	보조치 모델 대비
기본모델	13.41[N]	-	-
보조치 모델	10.40[N]	22.45[%]	-
Z=1.5[mm]	8.20[N]	38.85[%]	21.15[%]
Z=3[mm]	7.80[N]	41.83[%]	25.00[%]
Z=3.5[mm]	7.70[N]	42.58[%]	25.96[%]
Z=4[mm]	7.60[N]	43.33[%]	26.92[%]
Z=4.5[mm]	7.90[N]	41.09[%]	24.04[%]

[4] T. Yoshimura, "Analysis of the reduction of detent force in a permanent magnet linear synchronous motor," IEEE Trans. on Magnetics, pp. 3042-3044, 1995.

[5] I. S. Jung, "Performance analysis of skewed PM linear synchronous motor according to various design parameters," IEEE Trans. on Magn., pp. 3653-3657, 2001.

[6] T. Ishikawa, "A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing", IEEE IAS Annual Meeting, pp. 42-49, 1997.

[7] 김용재, 조경필, 이규명, 김성진, 조금배, "단부 코깅력 저감을 위한 영구자석 선형 동기 전동기의 계단형 보조치 설계", 대한전기학회 전기 기기 및 에너지변환시스템 부문회 2011년계학술대회 논문집, pp. 49-51, 2011.