

초정밀 구동용 영구자석 선형 동기전동기(PMLSM)의 자기회로 설계

김성일, 하재평, 남혁, 이지영, 홍정표, 조한익\*  
 창원대학교 전기공학과, OTIS-LG\*

Magnetic Circuit Design of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM)  
 for Super Precision Control System

Sung-Il Kim, Jae-Pyeng Ha, Hyuk Nam, Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong, Han-ik Cho\*  
 Changwon National Univ., OTIS-LG\*

**Abstract** - This paper deals with the characteristics of the permanent magnet type linear synchronous motors(PMLSMs). Firstly, the structures and the characteristics of a slotted type and a slotless type PMLSM are compared. Secondly, the analyses and the design methods of each motor are presented. Finally, slotted type PMLSM and slotless type PMLSM are designed using the presented design method.

롯에 의한 디텐트력이 발생하지 않으므로, 추력 리플을 현저히 감소시킬 수 있고, 이로인해 제어성능 향상에 상당한 잇점이 있다. 그러나 철심을 사용하지 않으므로 유효 공극이 커져 같은 입력의 철심형보다 추력이 많이 떨어지는 단점이 있다. 그래서 공심형 PMLSM은 효율적인 측면에서 불리하기 때문에 추력용 기기보다는 정밀 제어용 액츄에이터로 많이 사용된다.

1. 서 론

오늘날 제조산업 분야에서의 세계적인 추세는 하드웨어적인 측면에서는 경박단소(輕薄短小)화를, 구동 부분에 대해서는 초정밀 제어를 위한 나노제어기술 개발을 요구하고 있다. 이에 따라 국내에서도 초정밀 선형 전동기 개발을 위한 전동기 설계 및 특성해석과 같은 요소 기술개발 및 확보에 대한 관심이 점차 고조되고 있다.

본 논문에서는 치, 슬롯 구조를 가지는 철심형 영구자석 선형동기전동기(Permanent Magnet type Linear Synchronous Motor; PMLSM)와 이들을 가지지 않는 공심형 PMLSM을 대상으로 초정밀 선형 전동기의 요구조건을 만족시키도록 자기회로 설계 및 특성해석을 수행하였다. 초정밀 구동을 위한 선형 전동기의 주요 요구조건 중에 하나인 추력 리플을 최소화하기 위해서는 대상 전동기에 대한 정확한 특성해석이 요구되므로, 각각의 전동기에 대한 특성해석 및 자기회로 설계 기법을 먼저 소개하였고, 이를 이용하여 철심형과 공심형 PMLSM의 초기 설계를 수행하였다. 이후 2차원 유한요소법(Finite Element Method; FEM)과 공간고조파법을 사용하여 설계된 두 종류의 전동기에 대해 구조적 특성에 따른 출력 특성을 비교, 분석하였다.[3]-[5]

2. 특성 해석 및 자기회로 설계이론

2.1 PMLSM의 구조 및 특성

PMLSM은 치, 슬롯 유무에 따라 철심형과 공심형으로 나누어진다.

철심형 PMLSM은 영구자석을 계자로 사용하고 치와 슬롯을 가지는 전기자 철심에 권선이 감긴다. 이러한 구조로 인해 발생 추력이 크고 효율이 높은 반면, 디텐트력이 발생하는 단점이 있다. 전기자 권선의 여자에 관계없이 발생하는 디텐트력은 추력 리플로 작용하여 진동 및 소음의 원인이 되며 제어성능에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 따라서, 철심형 PMLSM의 제어성능을 향상시키기 위해서는 이를 줄이기 위한 연구가 필요하다.

공심형 PMLSM 또한 영구자석을 계자로 사용한다. 그러나 전기자 권선이 철심에 권선되지 않는 것이 철심형과의 가장 큰 차이로 볼 수 있다. 이런 구조 때문에 치, 슬

2.2 철심형 PMLSM의 설계과정

그림 1은 철심형 PMLSM의 설계 과정을 나타낸 것이다. 먼저 시스템의 사양에 따른 전동기의 설계 제한으로부터 전동기의 추력 및 역기전력 상수를 계산한다. 그 다음 영구자석의 제원과 코일대 극간격의 비를 선택한 뒤 퍼미언스법으로 공극자속밀도의 초기치를 계산하고 이 공극자속밀도와 전류밀도로부터 권선수를 결정한다. 공극자속밀도의 초기치가 결정되고 권선설계가 이루어지면 가동자와 고정자의 기구적 세부 치수를 결정할 수 있다. 결정된 각 치수로부터 공간고조파법을 이용하여 공극자속밀도를 계산하고, 초기의 공극자속밀도와 비교하여 1[%] 이하의 오차에 수렴할 때까지 권선설계 이후의 과정을 반복한다. 이때, 공간고조파법을 이용하기 위하여 자기적 유효 공극은 기계적 공극을 카터계수로 보정하였다.

공극자속을 만족하는 권선수와 세부치수가 결정되면 전동기의 전체 치수가 제약 조건을 만족하는지 판단하여 제약 조건의 범위를 벗어날 경우 코일과 극간격 비의 선정 과정에서부터 다시 설계를 진행하게 된다.

이와 같이 결정된 전동기의 치수와 영구자석 및 권선 사양으로부터 유한요소 해석을 수행하여 추력 상수를 계산하고 만족하지 않을 경우에는 공극자속밀도의 초기치 설정부터 다시 설계를 진행한다. 재설계를 수행한 결과 발생 추력을 만족할 경우에는 치와 요크에서의 포화 정도를 확인하고 포화가 심한 경우 치수를 재조정하여 설계를 완료한다.

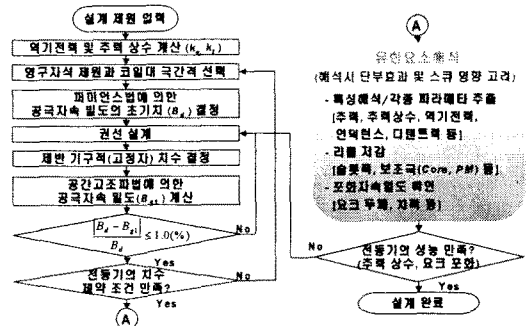


그림 1 철심형 PMLSM의 설계 과정

### 2.3 공심형 PMLSM의 설계 과정

공심형 PMLSM은 그림 2와 같은 과정을 거쳐 설계를 진행하였다. 설계 과정에서 보듯이 철심형 PMLSM과 설계 과정은 거의 유사하지만, 공심형 PMLSM은 치, 슬롯 구조를 가지지 않기 때문에 영구자석에 의한 디텐트력이 발생하지 않으므로 디텐트력 저감을 위한 설계 과정은 필요로 하지 않는다.

## 3. 자기회로 설계

### 3.1 전동기 설계 사양

본 논문에서 초정밀 구동을 위한 전동기의 설계사양은 표 1과 같다. 영구자석의 제원은 표 2와 같으며, 운전 조건과 제작성 등을 반영한 기타 고려 사항을 표 3에 나타내었다.

### 3.2 전동기의 초기 설계 결과

전동기의 설계사양으로부터 전동기의 설계이론과 구조에 따른 설계기법을 이용하여 얻은 전동기의 초기 설계결과를 표 4에 나타내었다. 초기 설계된 각 전동기의 형상은 그림 3 및 그림 4와 같다.

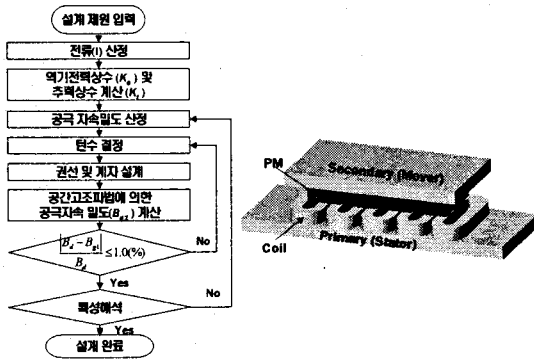


그림 2 공심형 PMLSM의 설계 과정

표 1 전동기의 사양 및 전원사양

항 목	수 치	항 목	수 치
정격추력(연속)	100[N]	구동방식	Sinewave 구동
최대추력	200[N]	최대추력시 속도	5.0[m/s]
정격전류	2.2[Arms]	정격추력시 속도	2.0[m/s]
추력 ripple	1% 이하		

표 2 영구자석의 제원

영구자석 제원		
재 질	Sumitomo NEOMAX 44	$B_r$ , 평균
$H_c$	1002.5(1043 ~962)[kA/m]	$B_r$ , 감자율
밀 도	7.5[g/cm <sup>3</sup> ]	비투자율 $\mu_r$
		1.33(1.30 ~1.36)[T]
		-0.11[%/°C]
		1.05

표 3 기타 고려사항

기타 고려사항		
전류밀도	7.0 [A/mm <sup>2</sup> ] (↓(자냉식))	권선배치 (2종류 중 택1)
점적율	70(나선)85(피복)	-집중권, 분포권 -코일간격/자극간격 비(2:3)

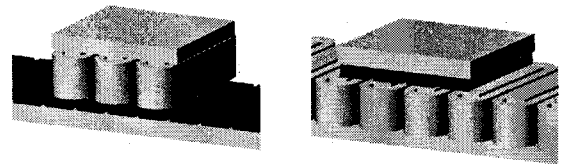
### 3.3 초기 설계 전동기의 특성해석 결과

유한요소 해석을 통해 얻은 각 전동기의 추력 및 디텐트력 특성을 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 공심형은 앞에서 언급하였듯이 단부효과와 치, 슬롯 구조에 의한 디텐트력을 근본적으로 제거할 수 있었다. 그러나 단 1차형 공심형의 경우는 고정자측에 영구자석이 위치하며 이에 의한 자계내에 유한한 길이의 가동자(자성체 요크)가 지나감에 따라 가동자에 의해 그 자기적 상태가 불균일하게 된다. 따라서 그림 6과 같이 단부효과에 의한 디텐트력이 발생하였다. 그러나, 영구자석이 가동자에 위치하는 단 2차 공심형은 영구자석에 의한 자계내에서 고정자측의 자기적 상태는 균일한 분포를 가지므로, 단 1차 공심형의 경우와 같은 디텐트력은 발생하지 않게 된다.

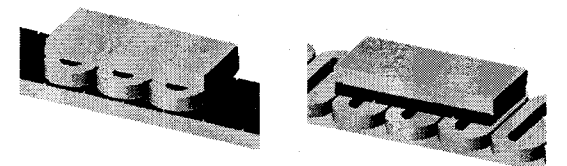
이와 같이 공심형은 철심형에 비해 자체 리플이 적거나 발생하지 않아 제어에 유리한 면을 가지지만 자기적 유효공극이 증가함에 따라 공극자속은 감소하게 된다. 따라서 공극자속의 감소분을 보상해 주기 위한 계자 또는 전기자의 부담이 증가하게 되어 치, 슬롯 구조의 철심형보다는 전체적인 치수가 증가하게 된다.

표 4 구조에 따른 각 전동기의 초기설계 결과

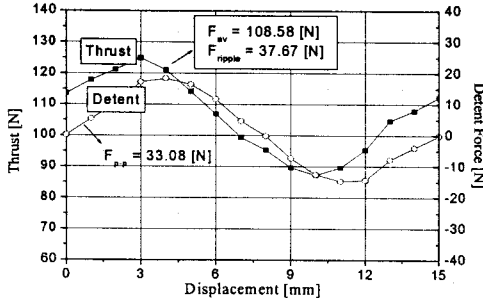
	철심형	철심형	공심형	공심형	단위
	단 1차형	단 2차형	단 1차형	단 2차형	
극수/코일수 /공극	4/3/2.0	4/3/2.0	4/3/2.0	4/3/2.0	-
영구자석 치수 (폭×높이×길이)	12.5×7.5 ×52	12.5×7.5 ×52	26×7.5 ×52	26×7.5 ×52	[mm]
영구자석 극간격	15.0	15.0	28.5	28.5	[mm]
가동자 치수 (폭×높이×길이)	60×36×52	60×18×52	114×19×52	114×22.5×52	[mm]
가동자 무게	0.883	0.395	0.827	1.01	[kg]
고정자 요크/가동자 요크	10.5/9	9/10.5	10/10	10/15	[mm]
코일당 권선수 (직경/가닥수)	280	280	280	280	
코일당 저항	2.31	2.31	18.62	18.62	[Ω]
슬롯 점적율	64.1	64.1	62.8	62.8	[%]
전류밀도	5.83	5.83	5.84	5.84	[A/mm <sup>2</sup> ]



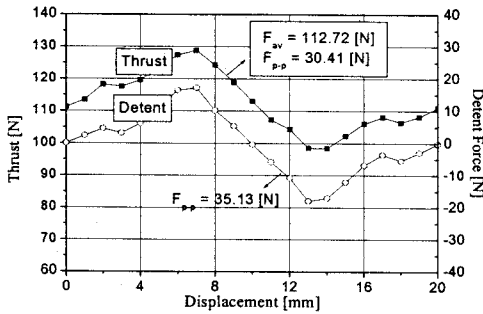
(a) 단 1차형 (b) 단 2차형  
그림 3 철심형 PMLSM의 초기설계 형상



(a) 단 1차형 (b) 단 2차형  
그림 4 공심형 PMLSM의 초기설계 형상

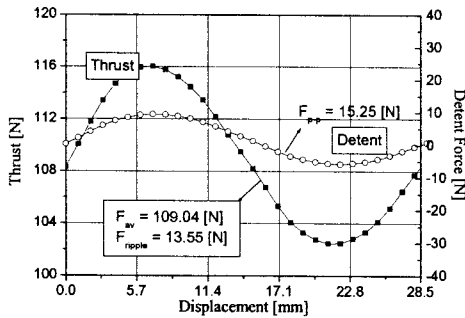


(a) 단 1차형

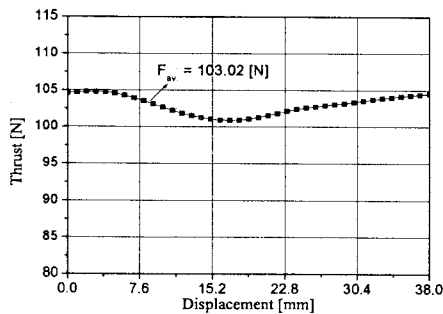


(b) 단 2차형

그림 5 철심형 PMLSM의 추력 및 디텐트력 특성



(a) 단 1차형



(b) 단 2차형

그림 6 공심형 PMLSM의 추력 및 디텐트력 특성

## 2.4 설계 전동기의 분석

초기 설계된 각 전동기의 특성값을 표 5에 나타내었다. 초정밀 구동에 필요한 선형 전동기의 개발을 위해서는 추력 리플이 중요한 관건이 된다. 따라서 이를 최소화 할 수 있는 자기회로 설계가 요구된다.

각 전동기의 자기회로 초기 설계결과에서 보듯이 추력 리플을 최소화 하기에 적합한 구조는 공심형이며 공심형의 단 1차형과 단 2차형 전동기의 특성을 비교해보면, 단 1차형은 영구자석이 고정자에 위치함으로써 위치검출이 용이하고 회로정수의 변화가 없어 제어에 유리하며 가동자에만 위치센서가 필요한 장점을 가지는 반면 가동자가 요크를 가질 경우에는 요크의 단부효과에 의한 디텐트력이 발생하는 단점이 있다.

단 2차형은 디텐트력은 발생시키지 않지만 고정자가 길어질수록 여자 전원이 늘어남으로 인해 전원의 손실이 커지므로 구간급전의 방식의 채택이 필요하게 되고 각 코일마다 위치검출용 센서가 요구된다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 초정밀 구동에 필요한 선형 동기전동기를 설계하기 위해 선형 전동기의 설계이론과 각 구조에 따른 설계기법을 이용하여 초기 설계를 진행하였다. 선형 동기전동기 개발을 위한 설계기법으로는 2차원 유한요소법과 공간고조파법이 사용되었으며, 이렇게 설계된 전동기 각각의 특성해석 결과로부터 초정밀 구동에 적합한 구조를 선정할 수 있었다. 향후 최종 설계된 전동기에 대해 시작기를 제작하여, 그 전동기로부터 파라미터를 추출하여 본 논문에서 수행한 특성해석 및 설계 결과와 비교하여 신뢰성 검증을 하고자 한다.

표 5 각 전동기의 특성값 비교

	철심형	철심형	공심형	공심형	단위
	단 1차형	단 2차형	단 1차형	단 2차형	
고정자 무게/ 영구자석무게 (단위길이당)	6.59/2.44	10.55/-	6.88/ 2.925	7.25/-	[kg/m]
가동자 무게/ 영구자석무게	0.883/-	0.395/ 0.146	0.827/-	1.01/ 0.333	[kg]
고정자 요크/ 가동자 요크	10.5/9	9/10.5	10/10	10/15	[mm]
코일당 권선수 (직경/가닥수)	280 ( $\phi$ 0.4/3)	280 ( $\phi$ 0.4/3)	600 ( $\phi$ 0.4/1)	600 ( $\phi$ 0.4/1)	
코일당 저항	2.31	2.31	18.62	18.62	[ $\Omega$ ]
추력 리플	37.67	30.41	13.55	0.08	[N]

## [참 고 문 헌]

- [1] 山田, "리니어 모터 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, 우준근, 홍정표, 김규탁, "영구자석 선형동기전동기의 디텐트력 최소화 기법 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, PP.763-765, 2000.
- [5] 임기채, 홍정표, 김규탁, "슬롯효과를 고려한 영구자석 선형 동기전동기의 특성해석", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.32-36, 1998.