

Slotless PMLSM의 고출력화를 위한 Core 형상 설계

김용철\*, 김미용, 김규탁  
 창원대학교 전기공학과

Core Shape Design of Slotless PMLSM for High Power

Yong-Chul Kim\*, Mi-Yong Kim, Gyu-Tak Kim

Department of Electrical Engineering, Changwon National University

**Abstract** - This paper present increasing of power density of slotless PMLSM by inserting core between phase winding. PM width is changed and PM is divided into two part to reduce and eliminate high order space harmonics affecting torque ripple.

Flux density, back EMF, inductance, thrust, normal and detent force are computed by 2D FEM, and analysis values are compared with each other.

1. 서 론

슬롯리스(slotless)형 영구자석 선형 동기전동기는 디텐트력이 없고 수직력이 작으므로 정확한 제어 특성이 요구되는 정밀 기기에 적합하나 출력밀도가 낮다. 반면 슬롯형(slotted) 영구자석 선형 동기전동기는 출력밀도는 높으나 디텐트력(detent force)이 크므로 제어성능이 떨어진다.[1, 3]

따라서, 본 논문에서는 이 둘의 장·단점을 보완하기 위해 슬롯리스(slotless)형 영구자석 선형 동기전동기의 모델에서 각 상 권선 사이에 철심을 삽입하는 방법으로 출력밀도를 높였고, 추력 리플에 영향을 미치는 공간고조파를 제거하기 위해 자석의 폭을 바꾸는 방법과 자석을 분할하는 방법을 채택하였다.

2차원 유한요소해석을 통해 공극 자속밀도, 역기전력, 인덕턴스, 추력 및 수직력과 디텐트력(detent force)을 해석, 비교하였다. 추력 및 역기전력의 크기 비교를 통해 출력의 향상을 확인하였고 고조파 분석을 통해 특정 고조파의 제거 및 디텐트력의 저감을 확인하였다.

따라서, 본 논문의 모델과 같이 간단히 철심을 삽입하고 영구자석의 크기만을 조절하는 방법만으로도 고출력화와 추력 리플저감효과를 동시에 얻을 수 있음을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 Slotless type PMLSM

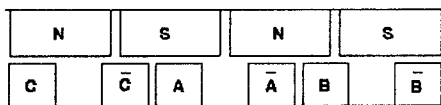


그림 1. Slotless type PMLSM 해석모델

그림 1은 슬롯리스형 PMLSM의 해석모델을 나타내고 있다. 그림과 같이 전기자측은 치-슬롯 구조가 없는 평활 철심으로 되어 있고 집중권으로 권선 되어있다. 구조상 큰 자기적 공극을 가지게 되므로 철심형에 비해 에너지 밀도가 떨어지게 된다.

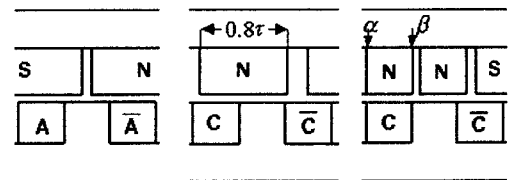
아래의 표 1은 슬롯리스형 모델의 주요 치수 및 제원을 나타내고 있다.

표 1. Slotless type PMLSM 의 사양

항 목	값(단위)	항 목	값(단위)
극 수	12	코일당 턴수	650 [턴]
잔류자속밀도	1.2 [T]	코일 높이	11 [mm]
영구자석 높이	12 [mm]	코일 폭	12 [mm]
영구자석 길이	73.5 [mm]	코일 간격	12 [mm]
영구자석 폭	26 [mm]	상전류(최대)	2.66 [A]
극 피치	28.5 [mm]	공극 길이	2 [mm]

2.2 성능향상을 위한 제안된 모델

본 논문에서는 슬롯리스형 모델의 큰 자기적 공극을 보완하기 위해 각 상 코일 사이에 철심을 삽입한 모델을 제시하였고 이에 따라 발생하는 추력 리플을 줄이기 위해 영구자석의 폭을 바꾼 모델, 그리고 영구자석을 분할한 모델을 제시하였다.



(a)core삽입형 (b)자극폭의80%PM형 (c)영구자석2분할형  
 그림 2. 성능향상을 위해 제안된 모델

그림 2의 (a)는 기존의 모델에서 각상 코일 사이에 간단히 철심만을 삽입한 모델이고, (b)는 5고조파를 제거하기 위해 영구자석이 극간격의 80%의 크기를 가지는 모델, (c)는 5, 7고조파를 제거하기 위해  $\alpha = \frac{3r_p}{35}$ ,

$\beta = \frac{17r_p}{35}$ 의 값을 가지는 모델이다.[2] 각 모델에서 나머지 모든 조건은 동일하다.

2.3 각 모델에 대한 해석결과

각 모델은 2차원 유한 요소법으로 해석하였고 x축으로 무한히 주기적으로 분포한다고 가정하였다.

### 2.3.1 공극 자속밀도

아래 그림 3의 (a), (b)는 각 모델에 대한 영구자석과 전기자 전류에 의한 공극 자속밀도의 x 및 y성분을 나타내고 있다.

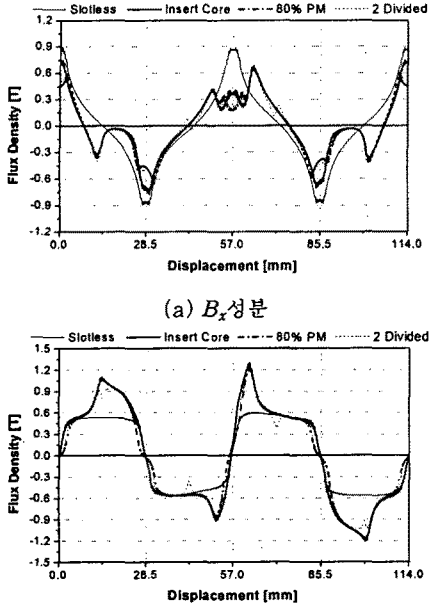


그림 3. 합성 공극 자속밀도

그림 3에서 자속 밀도의  $B_y$ 성분이 기존의 슬롯리스 모델에 비해 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 철심삽입으로 인해 자기저항이 줄어든 결과이다.

### 2.3.2 역기전력

역기전력은 영구자석에 의한 자계 중에서 y성분만을 적분하여 쇄교자속을 구한 뒤 그 변화량으로 계산할 수 있다. 역기전력은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \int_x B_y^{tm} dx \quad (1)$$

여기서  $l_z$ 는 적층 방향 길이,  $N$ 은 턴 수이다.

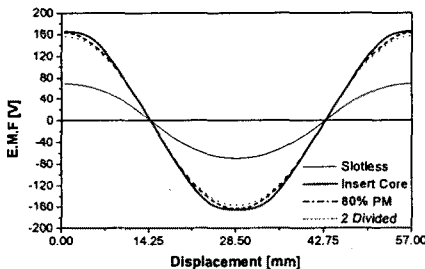


그림 4. 역기전력 ( $v=2m/s$ )

그림 4는 각 모델에 대한 역기전력 해석 결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 기존 슬롯리스형에 비해 철심을 삽입한 모델에서 역기전력이 크게 증가했음을 알 수 있다. 이 역기전력이 기기의 출력과 동일함으

로 출력이 크게 향상되었음을 확인할 수 있다.

표 2. 역기전력 기본파 크기비교

모델	실효치 [V]	상대치 [%]
Slotless	49.03	41.84
Insert Core	117.19	100
80% PM	115.62	98.66
2 Divided	110.97	94.70

표 2는 각 모델에 대한 역기전력의 기본파 크기를 비교하고 있다. 기존의 슬롯리스 모델에 비해 철심을 삽입함으로써 역기전력이 2배이상 증가한 결과를 얻을 수 있다.

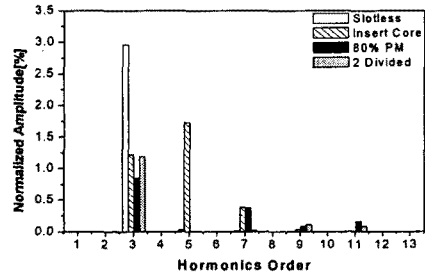


그림 5. 역기전력 고조파 분석

그림 5는 각 모델에 대한 역기전력의 고조파 분석결과이다. 철심 삽입모델에서 5, 7고조파 성분이 크게 증가하였고, 영구자석이 자극 폭의 80%크기인 모델에서는 5 고조파가 제거되었고, 영구자석 2분할 모델에서는 5, 7 고조파가 동시에 제거됨을 확인할 수 있었다.

### 2.3.3 인덕턴스

유한 요소법을 이용하여 인덕턴스를 계산하는 방법으로는 쇄교자속법과 에너지 중첩법이 널리 사용되고 있는데, 본 논문에서는 에너지 중첩법을 사용하여 인덕턴스를 산정하였다. 자기에너지를 이용한 인덕턴스를 계산하기 위해서는 먼저 영구자석과 전기자 전류를 동시에 여자하여 비선형 해석을 수행한 후 각 요소의 투자율을 저장한다. 그리고 이 상태에서 전류만 여자하여 선형 해석을 함으로써 이 자기 에너지로부터 인덕턴스를 계산할 수 있다. 저장에너지로부터 인덕턴스를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$W_m = \int_0^B H dB = \int_0^{\lambda} i(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$L = \frac{\lambda i}{i^2} = \frac{2W_m}{i^2} \quad (3)$$

해석결과 기존의 슬롯리스형 PMLSM은 자기 인덕턴스가 30.86mH, 상호 인덕턴스가 9.08mH이고, 철심을 삽입한 모델의 경우 자기 인덕턴스가 69.45mH, 상호 인덕턴스가 24.42mH로 크게 증가 하였다. 이것은 철심삽입에 따른 자기적 공극이 크게 준 효과에 역시 기인한 결과이다. 영구자석의 형상과 관계없이 인덕턴스는 동일하므로 나머지 두 모델의 인덕턴스는 다시 계산할 필요가 없다.

### 2.3.4 디텐트력

본 논문의 모델 중 철심을 삽입한 모델은 자기적 공극의 불균일로 인한 자기저항 차로 인해 디텐트력이 발생하게 된다. 이 디텐트력은 영구자석만을 여자하여 구한 공극 자속밀도를 이용하여 맥스웰 용력(Maxwell

stress tensor)으로 구할 수 있다.

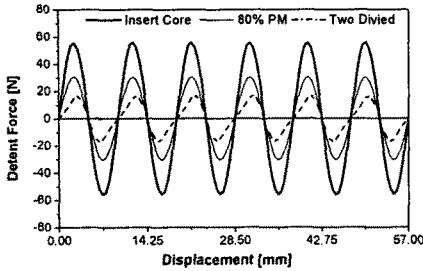


그림 9. 디텐트력

각 모델에 대한 해석결과를 그림 9에서 보여주고 있다. 이 디텐트력은 추력의 기본파에 비해 6고조파 성분에 해당되며 치-슬롯 구조에 의한 슬롯고조파이다. 영구자석이 자극폭의 80%인 모델과 영구자석 2분할 모델의 경우 그 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

### 2.3.5 추력 및 수직력

공극에서의 발생력은 최종적으로 계산된 공극 자속밀도로부터 맥스웰 응력(Maxwell stress tensor)법을 이용하여 계산하였다. 추력 및 수직력은 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$F_x = \frac{l_z}{\mu_0} \int B_x B_y dx \quad (4)$$

$$F_y = \frac{1}{2\mu_0} \int (B_y^2 - B_x^2) dx \quad (5)$$

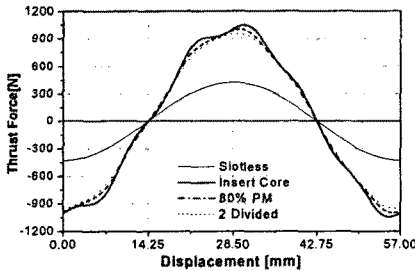


그림 6. 추력

그림 6은 각 모델에 대한 추력을 나타내고 있다. 그림과 같이 철심 삽입형 모델이 기존 슬롯리스형 모델에 비해 추력의 크기가 2배 이상 향상되었음을 확인할 수 있다. 다소의 추력 리플이 포함되어 있는 것을 확인할 수 있는데 이는 철심 삽입에 따른 디텐트력이 포함되었기 때문이다.

표 3. 추력 기본파 크기 비교

모델	최대치 [N]	상대치 [%]
Slotless	427.86	42.6
Insert Core	1004.27	100
80% PM	988.39	98.42
2 Divided	952.41	94.83

표 3은 각 모델의 추력의 기본파에 대한 크기 비교를 나타내고 있다. 이 결과는 역기전력에서와 거의 유사한 결과를 확인할 수 있다.

결론적으로 본 논문의 모델에서와 같이 간단히 철심만

을 삽입함으로써 기존 모델에 비해 추력이 2배이상 증가한 결과를 얻을 수 있었다.

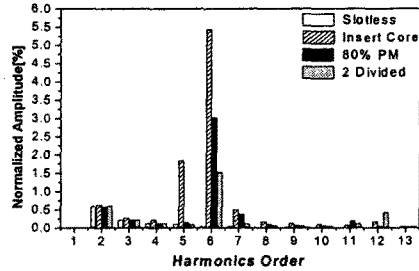


그림 7. 추력 고조파 분석

그림 7은 추력에 대한 고조파 분석 결과이다. 철심을 삽입함으로써 슬롯 고조파인 5, 6, 7고조파가 발생하였고, 영구자석이 자극폭의 80%크기인 모델의 경우 6, 7고조파의 크기 감소와 함께 5고조파가 제거되었고 영구자석 2분할 모델의 경우 6고조파 크기 감소와 함께 5, 7고조파가 완전히 제거됨을 확인할 수 있다. 분할형의 경우 기본파에 비해 고조파가 차지하는 비율이 2%미만 이므로 제어성능에 크게 영향을 미치지 않으리라 생각된다.

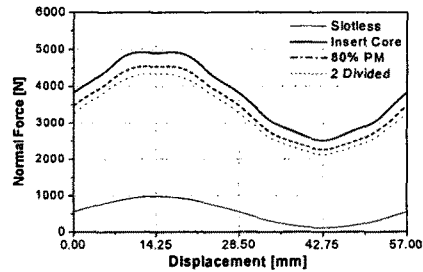


그림 8. 수직력

그림 8은 각 모델에 대한 수직력을 나타내고 있다. 기존 슬롯리스형 모델에 비해 크기가 다소 증가함을 알 수 있다. 이는 수직력이 공극 자속밀도의 y성분의 제곱에 비례해서 증가함에 기인한 결과이다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 기존의 슬롯리스형 PMLSM 모델의 출력 향상을 위해 철심을 삽입한 모델을 제안하였고 이에 따라 발생한 추력 리플을 저감 시키기 위해 영구자석의 형상을 변화시킨 모델을 제안하였다. 각 모델에 대해 2차원 유한 요소법을 통해 해석결과를 비교하였다. 해석 결과 기존의 슬롯리스형 모델에 비해 철심을 삽입한 모델에서 출력이 크게 향상됨을 확인할 수 있었고 다소의 추력 리플이 발생함을 확인하였다.

본 연구는 과학기술부 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

### (참 고 문 헌)

[1] I. Boldea, S.A. Nasar, Linear Motion Electromagnetic Systems, John Wiley and Sons, 1985.  
 [2] 김규탁, "분할자석형 편극식 리니어 동기 모터의 정특성 및 제동도제 효과", 전기학회논문지, 47권 6호, 756-762, 1998  
 [3] 천장성, "급가속용 선형 동기전동기의 특성해석 및 최적설계", 서울대학교 박사학위 논문, 1999