

자석 분할 방법에 의한 공심 코일형 LSM의 토크리플 저감

김용철, 김미용, 문재윤, 김규탁  
 창원대학교 전기공학과

Reduction of Torque Ripple of Slotless PM Linear Synchronous Motor with Divided Permanent Magnet

Yong-Chul Kim, Mi-Yong Kim, Jae-Yoon Moon, Gyu-Tak Kim  
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

**Abstract** - This paper deals with reduction of torque ripple of slotless PM linear synchronous motor (PMLSM) with divided permanent magnet using 2D analytical method. To confirm the validity of this study, analysis values by analytical method are compared with the results of 2D FEM and experimental results. And the results of divided PM model is compared with none divided PM model.

1. 서 론

선형 동기전동기(LSM)은 일반 회전형 전동기에 비해 자체 효율이 낮고 역률이 떨어지는 단점에도 불구하고 직선 추력을 발생시키므로 직선운동이 요구되는 여러 분야에 이용되고 있다[1]. 특히 공심코일형(slotless type)은 큰 자기적 공극으로 인한 출력밀도가 떨어지는 단점이 있으나, 디텐트력(detent force)을 근본적으로 제거할 수 있으며 수직력이 작아지기 때문에 고도의 제어특성이 요구되는 정밀 시스템에 적합하다[2].

그러나, 영구자석에 의한 공간고조파의 영향이 크게 나타나 토크리플 발생등 기기의 제반특성이 나빠지게 되므로 영구자석에 의한 고조파 성분을 제거시키기 위해 자석 분할 방법이 제안되었다[3]. 또한, 공심형은 구조가 매우 간단하고 포화 현상이 거의 발생하지 않으므로 해석적 방법(analytical method)으로도 정확한 특성 해석 결과를 얻을 수 있다[1,3].

따라서 본 논문에서는 자기스칼라 퍼텐셜을 계변수로 영구자석의 자화분포를 자화벡터로 푸리에 급수 전개하여 영구자석에 의한 공극자계와 전기자 전류에 의한 공극 자계를 각각 구한후 이를 중첩시켜 합성 자속을 계산하였다. 영구자석에 의한 공극에서의 자계를 계산한 후 역기전력을 계산하였고, 전기자 전류에 의한 공극에서의 자계 분포로부터 인덕턴스를 계산하였다. 영구자석과 전기자 전류에 의한 각각의 공극 자계를 중첩시켜 합성 자계를 계산하여 가동자의 변위에 따른 추력 및 수직력을 계산하였다. 그리고 2차원 해석적 방법에 의한 해석 방법의 타당성을 입증하기 위해 영구자석 분할 전 모델의 해석 결과를 2D FEM 해석결과 및 실험 결과와 비교하여 제시하였다. 그리고 영구자석 분할 전 모델과 2분할된 모델의 해석적 방법의 결과를 비교하여 고조파 분석을 통해 고조파 성분의 저감 및 특정 고조파 성분의 제거를 확인하였다.

2. 본 론

2.1 공극자계의 계산

해석적인 방법을 이용하여 슬롯리스형 PMLSM의 특성해석을 할 경우 다음과 같은 가정을 두면 해석모델은 간단히 2차원 문제가 된다[1].

① 해석 모델에서 적층방향(z축 방향)으로의 길이는 무한대이다.

② 영구자석과 전기자 전류에 의한 자화분포는 y축 방향으로 균일하게 분포하며 z축방향으로 무한히 주기적으로 분포한다.

③ 철심의 투자율은 무한대이며 포화현상은 무시한다.

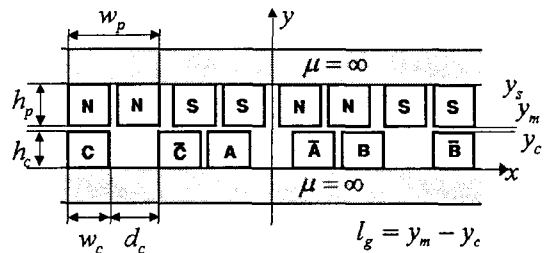
2.1.1 영구자석에 의한 자계

영구자석에 의한 공극의 자계 계산시 자기스칼라퍼텐셜  $\phi$ 를 계변수로 두면 각 영역에서 식(1), (2)와 같은 지배방정식을 유도된다. 자기스칼라퍼텐셜을 계변수로 두게되면 영구자석의 자화분포를 그대로 이용할 수 있어 계산이 편리해진다.

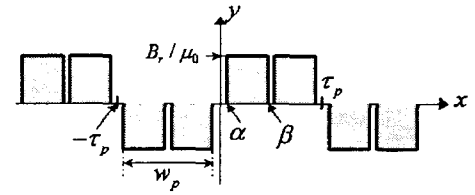
$$\nabla^2 \phi_I(x, y) = 0 \quad (\text{공극 영역}) \quad (1)$$

$$\nabla^2 \phi_{II}(x, y) = \frac{\nabla \cdot \mathbf{M}}{\mu_r} \quad (\text{영구자석 영역}) \quad (2)$$

그림 1은 분할자석 영구자석형 LSM을 나타내며 주기적으로 배치된 영구자석은 그림 1(b)와 같이 주기적인 자화 분포를 가진다.



(a) 해석 모델



(b) 2분할형 영구자석의 자화 분포  
 그림 1. Slotless PMLSM

식 (2)에서  $\mathbf{M}$ 은 영구자석의 자화벡터이고  $\mathbf{M}$ 이 균일하다고 가정하면 식(2)의 우변도 0이 되어 자화는 경계조건으로 적용되며 자화분포가 무한히 주기적인 분포를 가진다는 가정하에 식(3), (4) 같이 푸리에 급수로 나타낼 수 있다.

$$M^{bm}(x) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} M_n^{bm} \sin(nk_p x) \quad (3)$$

$$M_n^{bm} = \frac{4B_r}{\mu_0 n \pi} \cdot [\cos(nk_p \alpha) - \cos(nk_p \beta)] \quad (4)$$

여기서,  $k_p = \pi / \tau_p$ ,  $\tau_p$ : 영구자석 극 간격

식 (3), (4)에서 2분할의 경우 5, 7고조파 성분을 0으로 하기 위한  $\alpha, \beta$ 값은 각각  $\frac{3\tau_p}{35}$ ,  $\frac{17\tau_p}{35}$ 이다.

식 (1),(2)의 지배방정식으로부터 구한 공극자속밀도는 다음과 같다.

$$B_x^{bm} = - \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} [\beta^{bm} \cdot \sinh(nk_p y) \cdot \cos(nk_p x)] \quad (5)$$

$$B_y^{bm} = - \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} [\beta^{bm} \cdot \cosh(nk_p y) \cdot \sin(nk_p x)] \quad (6)$$

$$\beta^{bm} = \frac{\mu_0 M_n \sinh(nk_p (y_m - y_s))}{\left[ \mu_r \cosh(nk_p y_m) \sinh(nk_p (y_m - y_s)) - \cosh(nk_p (y_m - y_s)) \sinh(nk_p y_m) \right]} \quad (7)$$

### 2.1.2 전기자 전류에 의한 자계

전기자 전류에 의한 자계는 자기벡터퍼텐셜을 계변수로 두고 지배방정식을 유도하는 것이 일반적이거나 계산의 편의를 위해 코일의 두께를 무시하고 전류를 전류 표면에만 집중적으로 분포한다고 가정하면 자기 스칼라퍼텐셜을 계변수로 두고 지배방정식을 유도할 수 있다. 이렇게 하면 영구자석에 의한 자계 계산시와 동일한 지배방정식이 구해지므로 다시 일반해를 구할 필요가 없다. 전기자 전류에 의한 자화분포를 푸리에 급수로 표현하면 식 (8)과 같고, 전기자 전류에 의한 공극에서의 자속밀도는 식 (9), (10)과 같이 계산할 수 있다.

$$M^{\infty}(x) = \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} M_n^{\infty} \cdot \cos(nk_c x) \quad (8)$$

$$M_n^{\infty} = \frac{4Jw_c}{n^2 \pi k_c} \cdot \sin\left(nk_c \frac{w_c + d_c}{2}\right) \cdot \sin\left(nk_c \frac{w_c}{2}\right)$$

여기서,  $J$ : 입력 전류 밀도,  $\tau_c$ : 코일 극간격,

$w_c$ : 코일변 폭,  $d_c$ : 코일 간격,  $k_c = \pi / \tau_c$

$$B_x^{\infty} = + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_2^{\infty} \sin(nk_c x) \sinh(nk_c y) \quad (9)$$

$$B_y^{\infty} = - \sum_{n=1}^{\infty} \beta_2^{\infty} \cos(nk_c x) \cosh(nk_c y) \quad (10)$$

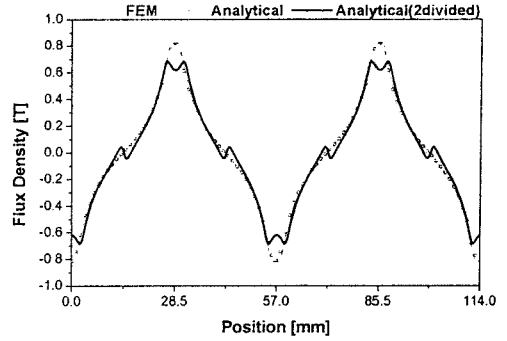
$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \mu_0 M_n^{\infty} \cos(nk_c x)$$

$$\text{여기서, } \beta_2^{\infty} = \frac{\mu_0 M_n^{\infty} \sinh(nk_c (y_c - y_s))}{\left[ \cosh(nk_c y_c) \sinh(nk_c (y_c - y_s)) - \cosh(nk_c (y_c - y_s)) \sinh(nk_c y_c) \right]}$$

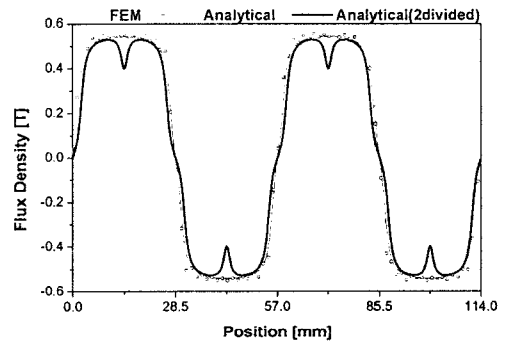
표 1은 본 논문에 사용된 모델의 제원을 나타내며 그림 2는 영구자석에 의한 공극에서의 자속밀도 분포를 각각 x, y 성분에 대해 나타낸다.

표 1. 해석 모델의 사양

항목	기호	값[단위]	항목	기호	값[단위]
극 수	$2p$	12	극 피치	$\tau_o$	28.5(mm)
산류자속밀도	$B_r$	1.2(T)	코일 높이	$h_c$	11(mm)
영구자석 높이	$h_o$	12(mm)	코일 폭	$w_c$	12(mm)
영구자석 길이	$l_o$	73.5(mm)	코일 간격	$d_c$	12(mm)
영구자석 폭	$w_p$	26(mm)	공극 길이	$l_e$	2(mm)



(a) Bx 성분



(b) By 성분

그림 2. 공극 자속밀도 분포

영구자석에 의한 공극자속의 y성분에 대한 고조파 해석 결과 그림 3과 같이 일체형의 경우 3, 5, 7 고조파가 존재하게 되지만 영구자석을 2분할로 할 경우 기본파에 대한 3고조파의 영향은 일체형과 대동소이하나, 5, 7고조파가 완전히 제거됨을 확인할 수 있다.

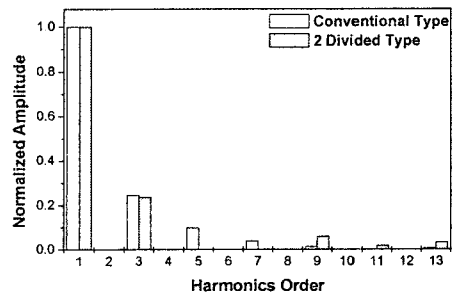


그림 3. 공극자속의 고조파 백분율

## 2.2 역기전력 및 인덕턴스

### 2.2.1 역기전력

역기전력은 영구자석에 의한 자계 중에서 y-성분만을 적분하여 쇄교자속을 구한 뒤 그 변화량으로 계산할 수 있다. 코일이 그 중심에 집중으로 분포한다고 가정하고 적분 구간을 코일 중심에 두었다.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N l_z \frac{d}{dt} \int B_{yt}^{bm} dx \quad (11)$$

여기서,  $l_z$ : 적층방향 길이,  $N$ : 턴 수

그림 4는 영구자석 일체형 모델과 2분할된 모델의 역기전력 파형이다. 분할 결과 영구자석 폭의 감소로 인해 역기전력 최대값은 34.45[V]에서 32.04[V]로 다소 낮아졌다. 그림 5는 기본파 성분은 제외하고 일체형 모델의 3차 고조파 성분을 기준으로 각 고조파의 크기를 나타낸 것이다. 고조파 분석 결과 분할형에서 3차 고조파 성분이 다소 줄어들고 5차, 7차 고조파 성분이 모두 제거됨을 확인할 수 있다.

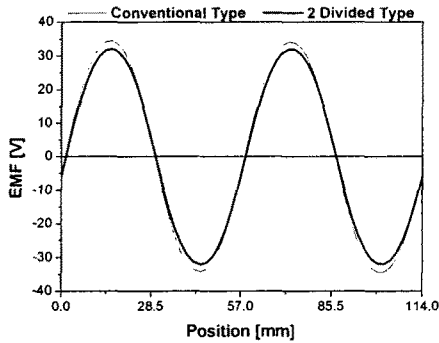


그림 4. 역기전력

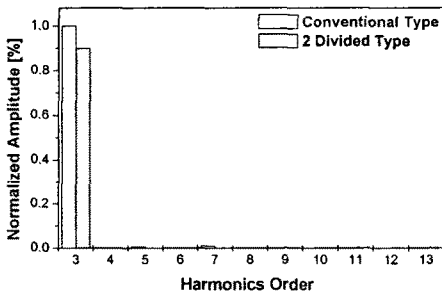


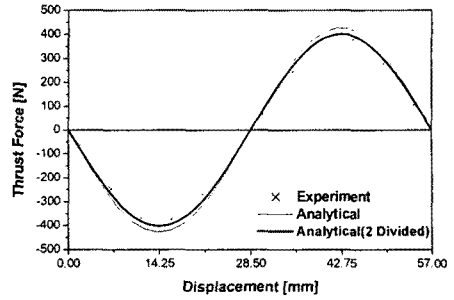
그림 5. 역기전력의 고조파 백분율

### 2.2.2 인덕턴스

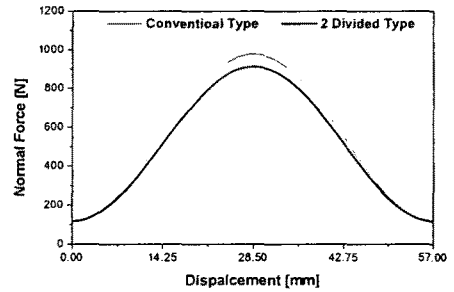
인덕턴스는 한 상의 전기가 전류에 의한 자계 중에서 y성분만을 적분한 쇄교자속으로부터 계산할 수 있다. 역기전력 계산시와 마찬가지로 적분구간을 코일중심에 두고 계산하였다. 계산결과, 자기 인덕턴스는 30.03[mH], 상호 인덕턴스는 9.07[mH]이고 실험치는 자기 인덕턴스 29.38[mH], 상호인덕턴스 9.07[mH]로서 그 오차는 자기인덕턴스에서 2.21%의 오차가 발생하였다.

### 2.3 추력 및 수직력

공극에서의 발생력은 최종적으로 계산된 공극자속밀도로부터 맥스웰 응력(Maxwell stress)법을 이용하여 계산하였다. 가동자 변위에 따른 추력과 수직력은 그림 6과 같고, 일체형에 비해 분할형의 추력과 수직력의 크기가 다소 감소하였다. 그림 7과 같이 고조파 분석 결과 일체형의 5고조파 성분을 기준으로 했을 때 분할형에서 5차, 7차 고조파 성분이 제거됨을 확인할 수 있다.



(a) 추력



(b) 수직력

그림 6. 이동자 변위에 따른 추력 및 수직력

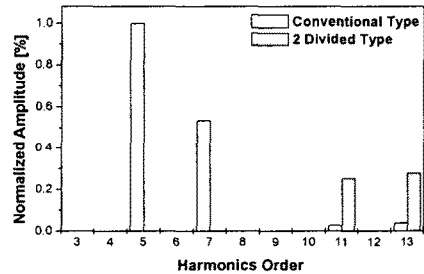


그림 7. 추력의 고조파 백분율

## 3. 결 론

본 논문에서는 자기포화 현상이 거의 발생하지 않는 슬롯리스 영구자석형 LSM을 해석적 방법을 이용하여 영구자석을 2분할 하여 공극의 자계 및 역기전력, 인덕턴스와 발생력을 계산하였다. 영구자석 일체형 모델과 2분할된 모델의 공극의 자속과 역기전력, 발생력의 고조파 분석을 통한 고조파 크기의 감소와 특정 차수의 고조파를 제거할 수 있었다. 해석 방법의 타당성을 검증하기 위해 영구자석 일체형 모델의 2차원 유한요소해석 결과 및 실험값과 비교하여 제시하였다. 해석적 방법으로도 유한요소해석 결과와 비교하여 거의 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] I.Boldea, S.A.Nasar, "Liner Motion Electromagnetic Systems, John Wiley and Sons, 1985.
- [2] 이주민, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "3차원 공간고조파법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형 동기전동기의 자계 및 추력 특성 해석", 전기학회논문지, 제50권 6호, 255-262, 2001
- [3] 김규탁, "분할자석형 권속식 리니어 동기 모터의 정특성 및 제동도체 효과", 전기학회논문지, 47권 6호, 756-762, 1998
- [4] 천장성, "급가속용 선형 동기전동기의 특성해석 및 최적설계", 서울대학교 박사학위 논문, 1999