

영구자석형 선형 동기전동기의 영구자석 Skew시의 특성해석

정인성, 허 진, 현동석  
한양대학교 전기공학과

Characteristics Analysis of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor in case of Skew of Permanent Magnet

In-Soung Jung, Jin Hur and Dong-Seok Hyun  
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

**Abstract** - The problem in improving the positioning precision of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM) is the detent force caused by the interaction of the magnets with the teeth of stator. This paper presents 3-Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network Method (3-D EMCN) for the analysis of PMLSM. 3-D EMCN is a numerical analysis method which supplements magnetic equivalent circuit by using numerical technique. We analyzed the fields and forces of PMLSM in case of skewed magnet and axially segmented magnet construction.

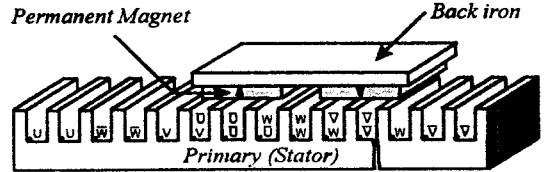


그림 1. PMLSM의 개략도

2. 해석 방법

2.1 해석모델

그림 1은 PMLSM의 개략도를 나타내고 있다. 고정자측은 치/슬롯구조를 가지는 코어에 3상 권선이 감겨져 있으며, 이동자측은 계자자속원으로서의 영구자석과 자속의 경로를 만들어주기 위한 back iron으로 구성되어 있다.

그림 2는 본 연구에서 해석하고자 하는 영구자석의 형상을 나타내고 있다. 그림 2(a)는 초기 모델을, 2(b)는 축방향으로 2분할하여 변위시킨 모델, 2(c)는 일반적인 skew 모델이다.

1. 서 론

영구자석형 선형 동기전동기(PMLSM)는 추력/전류비가 높고 제어가 용이하며 직접 직선추력을 발생하므로 최근들어 고속지상 운송 수단으로서 뿐만 아니라 고충밀 응용 고속 엘리베이터, 반송 시스템 및 서보 시스템의 구동원으로 많이 연구되고 있다.

PMLSM은 계자원으로 영구자석을 사용하기 때문에 영구자석과 전기자측의 치, 슬롯구조에 의해 필연적으로 detent force가 발생하게 된다. 이러한 detent force는 전동기의 추력리플로 작용하여 기기의 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라 기기의 제어성능을 악화시킨다. Detent force를 저감시키기 위한 방법들로 영구자석의 자극폭을 적절히 선정하는 방법, 영구자석의 형상을 변화시키는 방법, 영구자석의 배치를 극간격 주기로 하지 않고 약간씩 변위시키므로써 서로간의 detent force의 합이 영이 되도록 하는 방법 등 여러 방법들이 연구된 바 있다. 또한 3차원적인 방법의 하나로 전기자 또는 영구자석에 skew를 주는 방법 등이 있다[1]-[3].

본 연구에서는 PMLSM의 영구자석 Skew시의 특성을 해석하고자 한다. PMLSM은 보통 회전기에 비해 기계적 공극이 크고 영구자석이 자기적인 공극으로 작용하기 때문에 공극에서의 누설자속 성분은 회전형 기기에 비해 커지게 된다. 또한 영구자석에 skew를 주는 경우에는 본질적으로 3차원적 특성을 가지는 모델이 되기 때문에 정밀한 해석을 위해서는 3차원적인 해석방법이 요구된다. 3차원적 형상을 가지는 기기를 해석하기 위한 수치적인 방법으로 3차원 유한요소법이 많이 사용되고 있으나 이 역시 복잡한 선처리 작업 및 방대한 행렬식을 계산하는데 많은 시간이 소요된다.

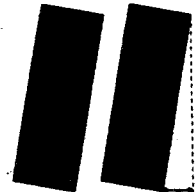
본 연구에서는 3차원 등가자기회로방법을 사용하여 영구자석 skew시의 PMLSM의 특성을 해석하고자 한다. 해석에 사용된 등가자기회로방법은 자기회로법에 수치적 기법을 도입하여 퍼미언스를 분포적인 회로정수로 사용하므로써 기기의 3차원적 형상을 비교적 쉽게 해석할 수 있는 방법으로, 본 해석법을 사용하여 skew각에 따른 자계해석을 수행하므로써 detent force가 최소화되는 적절한 skew각을 구하고자 한다.



(a) 초기 모델



(b) 2분할 모델



(c) skew 모델

그림 2. 해석모델의 영구자석의 구성

2.2 3차원 등가자기회로방법

본 연구에서 사용한 3차원 등가자기회로방법은 분포정수로 퍼미언스를, 계변수로서 자기스칼라 포텐셜을 사용하여 해석모델의 분포적인 특성을 해석하는 방법이다. 해석모델에 대하여 전체영역을 매질의 종류에 따라 영역을 구분한 후, 영역을 세밀히 요소분할하고, 각 요소의 중점에 절점을 잡고 이를 잇는 등가자기회로망을 구성하게 된다. 본 연구에서는 해석모델이 선형기이므로 요소는 직육면체로 구성되어진다.

그림 3은 임의의 절점  $(i, j, k)$ 에 대해  $x, y, z$  방향에 따른 3차원 등가자기회로망의 기본적인 구성을 나타내고 있다. 각 요소의 거리와 단면적과 재질정수에 의해 구해지는 요소 퍼미언스의 병렬함으로써 절점  $(i, j-1, k)$ 에서의  $y$ 방향으로의 두 절점사이의 퍼미언스를 구하면 다음과 같다(4).

$$P_{y_{i,j-1,k}} = \frac{\mu_0 \mu_1 \mu_2 S_{y_{i,j,k}}}{\mu_0 \mu_1 y_{i,j-1,k} + \mu_0 \mu_2 y_{i,j-1,k}} \quad (1)$$

여기서,  $S_{y_{i,j,k}}$ 는 두 개의 절점  $(i, j, k)$ 와  $(i, j-1, k)$ 사이의  $y$ 방향의 단면적이며,  $y_{i,j,k}, y_{i,j-1,k}$ 는 각 요소의  $y$ 방향의 길이이며  $\mu$ 는 재질의 투자율이다. 마찬가지로  $x$ 방향 및  $y$ 방향의 퍼미언스도 식(1)과 같은 방법으로 구해진다.

일반적인 자기회로에서의 자속은 자기저항의 역수인 퍼미언스와 절점의 자위의 차(기자력)의 곱과 같다. 계변수로 자기스칼라 포텐셜을 사용하는 임의의  $(i, j, k)$ 와  $(i, j-1, k)$  사이에서의  $y$ 방향으로의 자속 및 자속밀도는 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi_{i,j-1,k} = P_{y_{i,j-1,k}}(U_{i,j,k} - U_{i,j-1,k} + E_{i,j-1,k}) \quad (2)$$

$$B_{y_{i,j-1,k}} = \Phi_{y_{i,j-1,k}} / S_{y_{i,j-1,k}} \quad (3)$$

여기서,  $U_{i,j,k}$ 는 절점  $(i, j, k)$ 의 자위값에 해당하는 미지의 값이며  $E_{i,j-1,k}$ 는 영구자석과 전기자권선의 기자력이다.

이와같이 임의의 절점에 대하여 각 방향의 자속식을 구성한 후 한 절점에서 자속의 유출입량의 합이 영이라는 자속의 연속조건을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\sum_{n=1}^6 \Phi_n = \Phi_{x_{i-1,j,k}} + \Phi_{x_{i+1,j,k}} + \Phi_{y_{i,j-1,k}} + \Phi_{y_{i,j+1,k}} + \Phi_{z_{i,j,k-1}} + \Phi_{z_{i,j,k+1}} = 0 \quad (4)$$

식(2)로부터 구한 자속을 식(4)에 대입하고 해석영역의 모든 절점에 대해 절점방정식을 구성하여 정리하면 다음과 같은 전체 계행렬식을 얻을 수 있다.

$$[P]\{U\} = \{f\} \quad (5)$$

$[P]$  : 퍼미언스 계수행렬,  $\{U\}$  : 절점자위 행렬  
 $\{f\}$  : 구동벡터(기자력 × 퍼미언스)

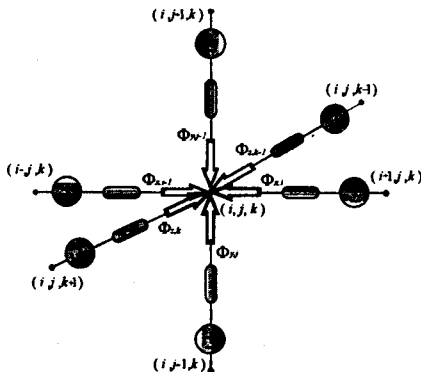


그림 3. 한절점에서의 등가자기회로망의 구성

식(5)를 풀어 각 절점의 자위를 구하면 식(2)와 (3)으로부터 기기 각 부분의 분포적인 자속과 자속밀도를 계산해 낼 수 있으며 힘은 맥스웰 용력법을 사용하여 구하였다.

### 3. 해석결과 및 검토

그림 4는 해석모델의 1극분에 대한 요소분할도를 나타내고 있다. 실제의 해석모델은 2극의 영구자석을 그대로 묘사하고 단부효과를 고려하기 위하여 1차측은 조금 더 넓게 해석영역으로 잡고 해석을 수행하였다. 해석모델의 주요치수를 표 1에 나타내었다.

그림 5는 해석결과를 검증하기 위한 실험세트를 나타내고 있다. 아직까지는 영구자석 초기모델에 대한 특성 실험만을 수행한 상태이며 추후 skew모델 및 분할모델에 대한 실험을 수행할 예정이다.

그림 6은 초기모델 및 2분할모델, skew모델에 대한 공극자속밀도분포를 나타내고 있다. 그림 7은 초기모델에 대한 이동자의 위치에 따른 detent force의 해석치 및 실험치를 나타내고 있으며, 해석치와 실험치가 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 8과 그림 9는 각각 2분할모델과 skew모델에 대하여  $\delta$ 의 크기를 변화시켜가면서 힘의 변화를 해석한 결과이다. Detent force를 최소화하기 위한  $\delta$ 의 크기가 2분할모델에서는 약 6.7(mm)가 되며, skew모델에서는 약 12.8(mm)가 됨을 알 수 있다.

표 1. 해석모델의 주요 사양

항목	값	항목	값
극간격	72 [mm]	자석 폭	50 [mm]
치폭	5 [mm]	자석 두께	10 [mm]
1 슬롯피치	12 [mm]	자석 길이	100 [mm]
적층폭	100 [mm]	공극	5 [mm]

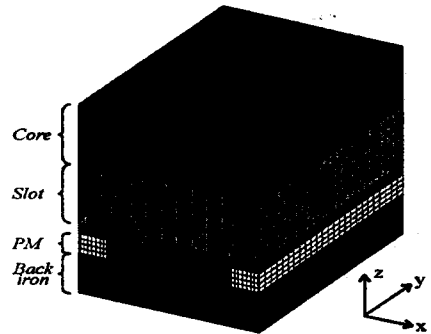


그림 4. 해석모델의 요소분할도

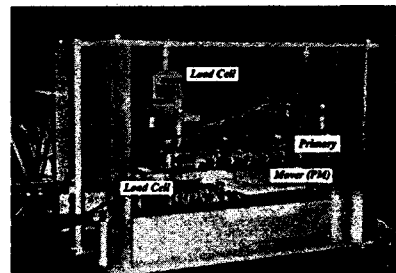
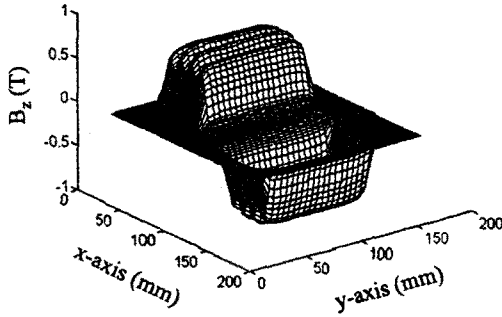
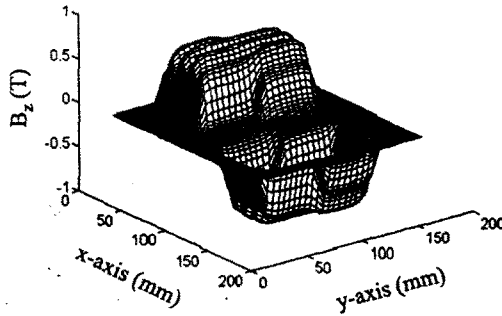


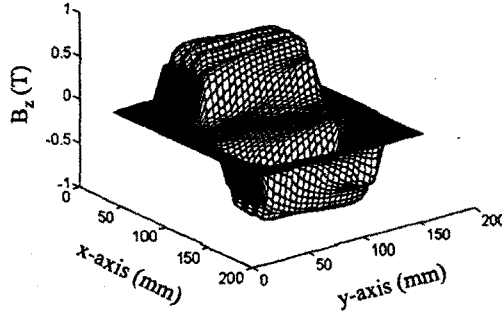
그림 5. 실험 장치



(a) 초기모델의 자속밀도분포



(b) 2분할 모델의 자속밀도분포 ( $\delta = 6$  [mm])



(c) skew 모델의 자속밀도분포 ( $\delta = 12$  [mm])

그림 6. 영구자석의 구성에 따른 공극자속밀도 분포도

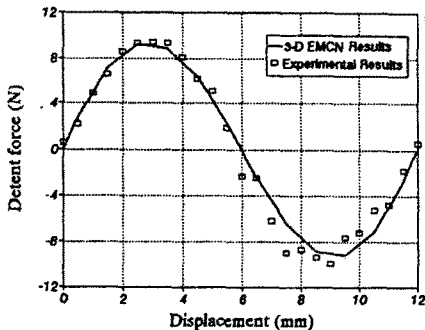


그림 7. 초기모델의 detent force 특성

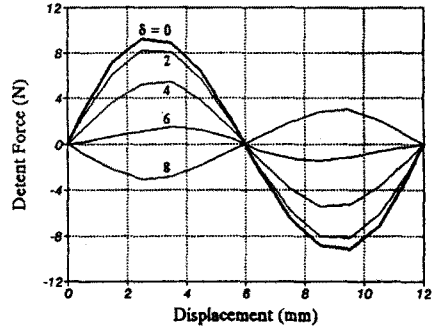


그림 8. 2분할 모델의  $\delta$ 에 따른 detent force 특성

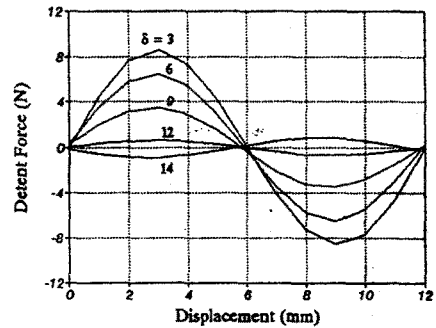


그림 9. Skew 모델의  $\delta$ 에 따른 detent force 특성

### 3. 결 론

본 연구에서는 PMLSM의 영구자석의 구성에 따라, 즉 영구자석을 축방향으로 2분할한 모델과 skew를 준 모델에 대하여 3차원 자계해석을 수행하였으며, 분할각 또는 skew각  $\delta$ 에 따라 detent force의 변화를 해석하므로써 detent force의 크기가 최소가 되는  $\delta$ 의 값을 구할 수 있었다. 3차원 자계해석을 위하여 3차원 등가 자기회로방법을 이용하였으며, 초기모델에 대한 실험을 통하여 해석결과와 타당성을 검증하였다. 추후 skew각  $\delta$ 에 따른 추력 및 역기전력파형 등의 기기의 제반특성의 변화를 해석할 예정이며, 본 해석법은 영구자석의 skew시 유용하게 사용될 수 있으리라 사료된다.

### (참고 문헌)

- [1] T. Ishikawa, G. R. Slemon, "A Method of Reducing Ripple Torque in Permanent Magnet Motors without Skewing", *IEEE, Trans. on Magn.*, Vol. 29, No. 2, pp. 2028-2030, 1993.
- [2] T. Yoshimura, H. J. Kim, M. Watada, S. Torii, D. Ebihara, "Analysis of the Reduction of Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", *IEEE, Trans. on Magn.*, Vol. 31, No. 6, pp. 3728-3730, 1995.
- [3] R. Akmes, J. F. Eastham, "Design of Permanent Magnet Flat Linear Motors for Standstill Applications", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 28, No. 5, pp.3042-3044, 1992.
- [4] J. Hur, S. B. Yoon, D. Y. Hwang and D. S. Hyun, Analysis of PMLSM Using 3 Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network Method, *IEEE, Trans. on Magn.*, Vol. 33, No. 5, pp. 4143-4145, 1997.