

## 유한요소법을 이용한 영구자석형 선형동기전동기의 동특성해석에 관한 연구

심 장호, 정 인성, 윤 상백, 현 동석  
한양대학교 전기공학과

## Dynamic Characteristic Analysis of Permanent Magnet Type Linear Synchronous Motor using FEM

Jang-Ho Shim, In-Soung Jung, Sang-Baeck Yoon, Dong-Seok Hyun  
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univ.

**Abstract** – This paper centers on a method which can reduce calculating time and maintain accuracy of whole model FE analysis with one pole model for short secondary Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM). We use one pole model which considers the number of pole of stator and mover respectively in order to replace whole model to one pole model and calculate flux linkage and back e.m.f. with accuracy. Also we verify the validity of proposed method with comparision of results of whole and one pole model.

## 1. 서 론

최근 들어 NdFeB계 영구자석의 출현에 따라 여러 종류의 영구자석형 전동기에 대한 관심이 높아 졌으며 많은 발전을 거듭하여 왔다. 영구자석을 이용한 전동기는 유도전동기에 비해서 높은 효율과 추력/전류의 비를 갖으며 가변주파수에 의한 가변속도 구동에 매우 적당하다[1]. 더욱이 선형동기전동기는 보조 기구 없이 직접 추력의 발생이 가능하고 제어의 용이성으로 로봇ックス, 산업자동화와 같이 고속, 고정밀을 요하는 분야에 많이 적용되고 있다.

영구자석형 선형동기전동기는 기계적 구조에 따라 단 2차(주로 이동자로서)와 장 2차(주로 고정자로서)로 구분되며[2] 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 공작기계 또는 엘리베이터의 구동원 등으로 사용 가능한 단 2차 선형동기전동기의 동특성해석에 대하여 다루었다.

기기의 실제적용에 앞서 고효율을 위한 설계와 제어 특성 향상 등을 위하여 과도 및 정상상태의 해석이 요구되어진다. 전기기기의 동특성해석은 권선에 쇄교되는 자속량과 그의 시간적 변화 및 이동자의 이동에 따른 역기전력등의 계산이 정확하게 이루어져야 한다. 회전형 전기기기의 경우 그 구조 및 제반 현상들이 주기성을 가지고 나타나기 때문에 보통 일부만을 해석영역으로 택하여 해석할 수 있으나 단

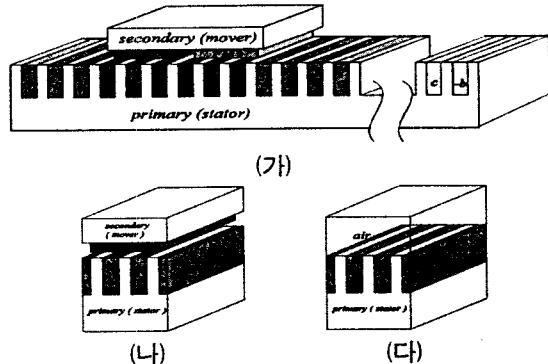


그림 1. 해석 모델

(가) 전체모델 (나) 영구자석을 포함한 1극  
(다) 영구자석을 포함하지 않은 1극

2차 선형동기전동기의 경우에는 영구자석이 주된 자계 및 추력발생원이기 때문에 정추력해석에 있어서는 영구자석의 극 수만을 고려한 해석이 가능하나, 동특성해석시 1극만을 해석영역으로 택할 경우에는 영구자석이 없는 고정자 극에서의 자속쇄교량을 고려할 수 없기 때문에 오차를 수반하며 구동환경에 따라 전체모델해석과는 큰 차이를 보인다. 따라서 단 2차 선형동기전동기의 동특성해석시에는 전체를 해석모델로 택하여야 한다. 그러나 전체모델해석의 경우에는 정확한 계산이 가능한 반면 해석영역이 크기 때문에 계산시간 및 선처리 과정이 길어지고 그에 따라 대용량의 계산기가 필요하다.

본 논문에서는 영구자석을 포함한 극과 포함하지 않은 극을 그 극 수와 함께 고려하여 1극 모델로서 전체모델해석과 같은 결과를 얻을 수 있으며 빠른 해석이 가능한 방법을 제안하였고, 각각의 해석방법에 따른 결과를 비교함으로써 타당성을 검토하였다.

## 2. 선형동기전동기의 유한요소해석

## 2.1 해석모델

2차원 유한요소해석을 위한 영구자석형 단 2차 선

형동기전동기는 그림 1과 같다. 해석모델의 1차측(고정자)의 극 수는 10극이고 2차측(이동자)의 극 수는 2극이다. 그림 1.(가)와 같은 전체모델은 그의 기계적 구조에 따라 그림 1.(나)와 그림 1.(다)와 같이 영구자석을 포함한 극과 포함하지 않은 극으로서 구분할 수 있으며 본 논문에서는 그림 1.(나)와 같이 영구자석을 포함한 1극을 이용하여 1극해석을 행하였다.

## 2.2 지배방정식과 전압방정식

해석모델인 영구자석형 선형동기전동기의 자기 벡터 포텐셜에 대한 지배방정식은 식(1)과 같다.

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_o + \vec{J}_m \quad (1)$$

$\vec{J}_o$ : 고정자 권선 전류밀도

$\vec{J}_m$ : 영구자석 등가 자화 전류밀도

영구자석 등가 자화 전류밀도  $\vec{J}_m$ 은 식(2)와 같이 주어지며  $\vec{M}$ 은 영구자석의 잔류자속밀도이다.

$$\vec{J}_m = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{M} \quad (2)$$

또한 전압방정식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(t) = Ri(t) + L_i \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\Phi_i(t)}{dt} \quad (3)$$

$L_i$ : 엔드부의 누설인덕턴스

$\Phi_i$ : 권선의 총 쇄교자속

그림 1.(나)와 같이 영구자석을 포함한 1극 모델을 이용함에 있어 그림 1.(다)와 같이 영구자석을 포함하지 않은 극들에 대한 고려가 있어야 하는데 이와 같은 극들에서는 추력발생이 없고 자속쇄교만이 있기 때문에 그 극 수를 고려한 누설인덕턴스로서 대체할 수 있다. 그림 1.(나)의 극에서는 영구자석에 의한 자속과 전류에 의한 쇄교자속이 같이 계산 되므로 그 극 수만을 고려하면 된다. 따라서 1극 모델이용에 있어 식(4)와 같이 수정된 전압방정식을 사용하여 해석하였다.

$$V(t) = Ri(t) + L_i \frac{di(t)}{dt} + L_{eq} \frac{di(t)}{dt} + N_m \frac{d\Phi_m(t)}{dt} \quad (4)$$

$L_{eq}$ : 영구자석을 포함하지 않은 극들에 대한 누설인덕턴스

$N_m$ : 영구자석을 포함한 극 수

$\Phi_m$ : 영구자석을 포함한 1극에서의 권선 총 쇄교자속

### 2.2.1 누설인덕턴스 $L_{eq}$

그림 1.(다)와 같이 영구자석을 포함한 극들에 대한 누설인덕턴스  $L_{eq}$ 는 다음과 같이 유한요소법을 이용하여 구하였다. 그림 1.(다)와 같은 1극에서 3상 권선 전류에 의한 a상 권선에 쇄교되는 자속은 식(5)와 같다.

$$\phi_a = L_s i_a + L_m i_b + L_m i_c \quad (5)$$

$L_s$ : 자기인덕턴스  $L_m$ : 상호인덕턴스

식(5)는  $i_b + i_c = -i_a$ 를 이용하면 식(6)과 같으며

$$\phi_a = (L_s - L_m)i_a \quad (6)$$

또한  $L_s$ 와  $L_m$ 은 같은 극에서 a상 전류만 인가시 식(7), (8)과 같이 구할 수 있다.

$$L_s = \frac{\phi_{aa}}{i_a} \quad (7)$$

$$L_m = \frac{\phi_{ba}}{i_a} = \frac{\phi_{ca}}{i_a} \quad (8)$$

$\phi_{aa}$ : a상 전류인가시 a상 쇄교자속

$\phi_{ba}$ : a상 전류인가시 b상 쇄교자속

$\phi_{ca}$ : a상 전류인가시 c상 쇄교자속

따라서 영구자석을 포함하지 않은 극들에 대한 누설인덕턴스는 그림 1.(다)에서 구한  $L_s - L_m$ 에 고정자의 극 수에서 이동자의 극 수를 감한 수를 곱하여 구할 수 있다.

## 2.2.2 계 방정식

전압방정식이 적용된 지배방정식을 풀기 위하여 Galerkin method를 이용하였으며 시간미분항은 후퇴 차분법을 이용하여 고려하였다. 식(4)에서 엔드부의 누설인덕턴스인  $L_i$ 를 무시한 전압방정식이 적용된 계 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} SS & -SC \\ -SC^T & -R\Delta t + L_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -SC^T & -R\Delta t + L_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} F \\ -V\Delta t \end{bmatrix}_{t+\Delta t} \quad (9)$$

## 2.3 이동자의 이동

유한요소해석시 시간차분법을 이용함에 있어 매 스텝마다 발생된 추력에 의한 이동자의 이동은 다음과 같은 운동방정식에 따라 구하였다.

$$f_t = (m_{mover} + m_{load}) \frac{d^2x}{dt^2} + a(v) \quad (10)$$

$f_t$ : 발생추력

$m_{mover}$ : 이동자의 질량

$m_{load}$ : 부하질량

$a(v)$ : 속도에 따른 마찰력

$x$ : 이동자의 이동거리

그리고 이동자에 가해지는 추력은 Maxwell stress tensor를 이용하여 구하였으며 이동자의 이동은 moving line technique을 이용하였다[3].

## 3. 해석결과 및 고찰

그림 2는 크기 30[V], 3[Hz]의 3상 정현전압에 의

한 자유운동시 해석결과이다. 해석결과로부터 초기에는 이동자의 속도가 낮아 동기속도에 못 미치기에 진동하며 전류의 왜곡이 나타난다. 시간이 지나면서 동기속도에 도달하고 가해지는 추력은 평균 0이 됨을 알 수 있으며 전류는 정현파로 나타난다. 해석시 해석모델의 사양은 표1과 같다.

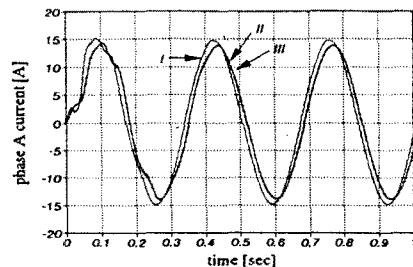
표1. 해석모델의 사양

	항목	값	단위
고정자	극 수	10	개
	극 간격	36	[mm]
	적층폭	100	[mm]
	슬롯 당 권선	100	회
이동자	극 수	2	개
	질량	1	[kg]
	영구 자석	잔류자속밀도 폭 높이	1.15 [T] 27 [mm] 5 [mm]
	공극	3	[mm]
	부하	5	[kg]

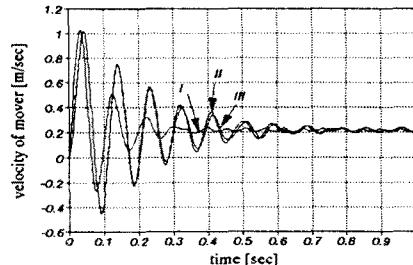
이동자의 극만을 고려한 해석(I)은 전체모델해석(III)의 결과와 비교해 보면 전류의 크기와 위상의 차이가 생기며 이동자에 가해지는 힘의 차이에 기인하여 속도와 이동거리 역시 오차를 수반하며 전체모델묘사에 적합치 않음을 쉽게 알 수 있다. 반면 제안방법에 의한 해석(II)과 전체모델해석(III)을 비교해 보면 전류와 이동자의 속도 및 이동거리 모두 전체모델해석(III)의 결과와 일치함을 알 수 있다. 또한 시간차분법을 이용함에 있어 시간스텝은 0.001[초]였고 해석시 전체모델의 경우 총 절점수는 2054개이며 시간스텝, 0.001[초]에 대하여 계산시간은 약 15[초] 정도 소요되었다. 반면 제안한 1극 모델은 총절점수가 484개이고 같은 시간스텝에 대하여 해석시간은 약 1.5[초] 소요되었으며 약 10배 정도 빠르게 해석 할 수 있었다. 따라서 제안한 방법은 빠르고 전체모델해석과 같은 정확성을 가지며 전체모델묘사에 적합한 방법이다.

#### 4. 결 론

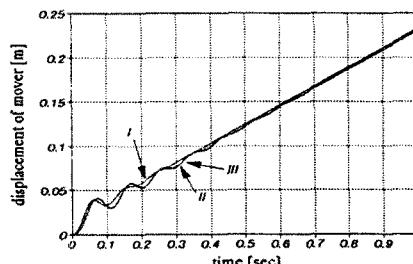
본 논문에서는 고정자와 이동자의 기계적 구조를 고려하여 1극 모델로써 단 2차 영구자석형 선형동기 전동기의 동특성해석을 행하였다. 해석결과의 비교로부터 제안방법은 전체모델묘사에 있어 적절한 방법임을 알 수 있었고 빠르고 정확한 해석이 가능하기 때문에 유한요소법을 이용한 설계와 제어 특성 향상 등의 연구에 유용한 방법이 될 것이다.



(가)



(나)



(다)

그림 2. 해석결과의 비교  
(가) A상 전류 (나) 속도 (다) 이동거리

#### [참 고 문 헌]

- [1] T. Sebastian, G. R. Slemmon, "Transient torque and short circuit capabilities of variable speed permanent magnet motors", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.MAG-23, No.5, pp.3619-3621, Sept.1987
- [2] G. Y. Xiong and S. A. Nasar, "Analysis of Fields and Forces in a Permanent Magnet Linear Synchronous Machine Based on the Concept of Magnetic Charge", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 25, No.3, pp.2713-2719, May 1989
- [3] I.S. Jung, S.B. Yoon, D.S. Hyun, D.H. Im and J.P. Hong, "Analysis of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor using FEM", *SMIC '96*, pp.233-236, Sept. 1996