

유한 요소법을 이용한 표면 영구자석형 선형 동기전동기의 특성 해석

류세현^a, 권병일^a, 우경일^a, 박승찬^b, 김창엽^c, 임태빈^d
 한양대학교 전기공학과^a, 한양대학교 공학기술연구소^b, 호서대학교 전기공학과^c, 전자부품 종합기술연구소^d

Characteristics Analysis of Surface Permanent Magnet Linear Synchronous Motor by Finite Element Method

Rhyu Se-Hyun^a, Kwon Byung-Il^a, Woo Kyung-Il^a, Park Seung-Chan^b, Kim Chang-Eob^c, Im Tae-Bin^d
 Hanyang University^a, RIET^b, Hoseo University^c, KETI^d

Abstract - This paper describes the characteristics analysis of surface permanent magnet linear synchronous motor with conductive sheet secondary using time-stepped finite element method. The detent force, normal force, back-emf and dynamic characteristics as speed, thrust and current are described.

1. 서 론

최근 각종 산업기술의 고속화, 고정밀도의 추세에 따라 직선운동을 요구하는 분야가 급증하고 있다. 이에 따라 종래의 회전운동을 주 구동원으로 하는 원형 전동기에 비하여 선형 전동기의 활용범위가 확대되고 있다. 이것은 직선형 전동기가 별도의 동력 변환 장치 없이 구동부 자체의 직선운동을 이용할 수 있기 때문이다. 영구자석형 선형 동기전동기(Permanent magnet linear synchronous motor : PMLSM)는 이러한 직선형 전동기의 한 종류로써, 고 에너지 밀도를 지닌 영구자석을 이용하여 고속, 고추력 운전에 적합하므로 반송시스템을 포함한 공작기계 및 리니어 엘리베이터 등의 응용에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 영구자석형 선형 동기전동기에 대한 특성 연구의 일환으로써, 2차원 시간 차분 유한 요소법을 이용하여 영구자석의 자화분포와 2차측 알루미늄 도체판 및 back-iron 의 도전율을 함께 고려한 특성해석을 하였다[1]. 그리고, 실제로 200W급 시작기를 설계, 제작하여 전동기의 속도에 따른 역기전력 및 detent force, 정추력을 측정하여 시뮬레이션과 비교하였고, V/f 일정시의 시뮬레이션에 의한 속도, 추력 및 전류특성을 고찰하였다[2][3].

2. 특성 해석

2.1 해석 모델

그림 1은 본 논문에서 해석하고자 하는 실제 모델을 나타내며, 표 1은 설계, 제작된 모델의 제원을 나타낸다.

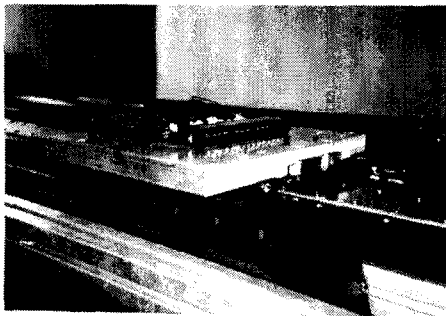


그림 1 해석 모델

표 1 해석 모델의 제원

파라미터	제 원	단 위
상 수	3	상
극 수	4	극
상당 권선수	80	turns
1차측 길이	213.5	mm
적 층 폭	50	mm
공 극	1	mm
알루미늄 높이	1	mm
자 석 두께	3	mm
자 석 길 이	35.7	mm
극 간 격	42	mm
back-iron 두께	10	mm

2.2 유한 요소 해석

영구 자석을 포함하는 계의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_o + J_e + \nabla \times \frac{1}{\mu_r} M_r \quad (1)$$

2차 도체판에 유기되는 기전력 E 는 식(2)와 같이 표현된다.

$$E = - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2)$$

전동기가 1차 철심의 적층 방향으로 무한하다고 가정하면, 앞에서 전제한 가정과 같이 자기벡터 포텐셜 A 와 전류밀도 J 는 z축 방향으로만 존재하게 된다. 또한, 잔류 자화량 M_r 이 x, y 성분만 존재한다고 보면 식 (3)과 같은 자기벡터 포텐셜을 이용한 해석영역의 2계 편미분의 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) = -J_o + \sigma \frac{dA_z}{dt} - \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial M_{rx}}{\partial x} - \frac{\partial M_{ry}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

해석영역 각각의 요소에 대하여 자기벡터 포텐셜 A^e 를 1차 형상함수 N_{ie} 로 근사화 해서 가중 잔차법을 위한 가중함수 N_{je} 를 도입하고 Galerkin법을 이용하여 잔차를 전영역에 대해서 적분하여 잔차를 영으로 하기 위해 각 요소에 대해 정식화하면 다음과 같은 식으로 전개된다.

$$\int_{s'} \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial N_{je}}{\partial x} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} + \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \right) A_{ie} dx dy$$

$$- \int_{s'} \frac{1}{\mu_r} \left(M_{rx}^e \frac{\partial N_{je}}{\partial y} - M_{ry}^e \frac{\partial N_{je}}{\partial x} \right) dx dy \quad (4)$$

$$- \int_{s'} J_o N_{je} dx dy - \sigma \frac{d}{dt} \int_{s'} \sum_{i=1}^3 N_{ie} N_{je} A_{ie} dx dy = 0$$

(j = 1, 2, 3)

식 (4)의 요소방정식을 전 요소에 대하여 조립하면, 식 (5)와 같은 각 절점에 대한 자기벡터 포텐셜과 각 상전류에 대한 선형연립방정식을 얻게 된다.

$$[[S] \quad -[C]] \begin{Bmatrix} [A] \\ [I] \end{Bmatrix} + \frac{d}{dt} [[T] \quad [0]] \begin{Bmatrix} [A] \\ [I] \end{Bmatrix} = [G] \quad (5)$$

여기서 [S]는 절점의 위치와 투자율에 관계된 계수행렬, [C]는 강제전류밀도의 계수행렬, [T]는 와전류밀도의 계수행렬, [G]는 등가 자화전류 밀도에 해당되는 구동 행렬을 나타낸다. 식 (5)는 방정식의 수보다 미지수가 3개(각 상전류에 해당) 더 많은 형태이므로 해를 구하기 위하여 다음에서 기술하는 각상에 대한 전압방정식과 결합되어 진다.

각 상에 대하여 Kirichhoff의 전압법칙을 적용하면, 식 (6)과 같은 전압방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [\Psi] + [L_o] \frac{d}{dt} [I] + [R][I] = [V] \quad (6)$$

여기서, [V] : 각상의 전압
 [I] : 각상의 권선 전류
 [R] : 각상의 1차측 권선 및 회로저항
 [L_o] : 각상의 1차측 누설 인덕턴스
 [Ψ] : 각상 권선의 쇄교 자속량

식 (6)에서 [Ψ]를 각 상의 권선 영역에서의 자기 벡터 포텐셜로 표현하여 다시 나타내면, 다음과 같이 된다.

$$l_{sk} [C]^T \frac{d}{dt} [A] + [L_o] \frac{d}{dt} [I] + RI = [V] \quad (7)$$

식 (5)와 식 (7)을 결합하면 각 절점의 자기벡터 포텐셜 [A]와 각 상의 권선에 흐르는 전류 [I]를 미지수로 하는 식 (8)의 시스템 matrix를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] & -[C] \\ [0] & [R] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [A] \\ [I] \end{Bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [T] & [0] \\ l_{sk} [C]^T & [L_o] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [A] \\ [I] \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [G] \\ [V] \end{Bmatrix} \quad (8)$$

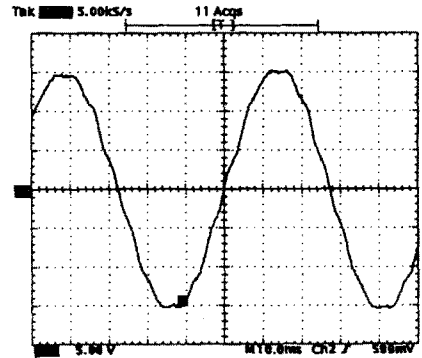
식 (8)의 시간 미분항을 후퇴 차분법을 이용하여 처리하여 식을 정리하면 식(9)와 같은 회로방정식을 고려한 전체 시스템 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] + \frac{[T]}{\Delta t} & -[C] \\ -[C]^T & -\frac{[L_o] + \Delta t [R]}{l_{sk}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [A] \\ [I] \end{Bmatrix}^{t+\Delta t}$$

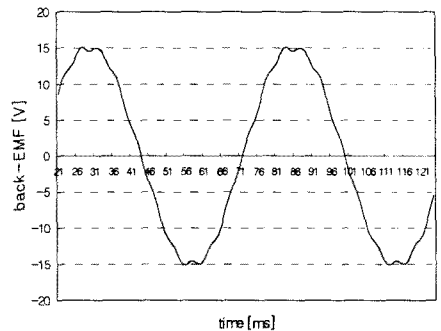
$$= \begin{bmatrix} \frac{[T]}{\Delta t} & [0] \\ -[C]^T & -\frac{[L_o]}{l_{sk}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} [A] \\ [I] \end{Bmatrix}^t + \begin{bmatrix} [G] \\ \frac{\Delta t}{l_{sk}} [V] \end{bmatrix}^{t+\Delta t} \quad (9)$$

3. 실험 및 해석 결과

그림 2는 이동자의 속도가 1.5[m/sec]일때의 역기전력 파형을 측정된 실험 결과와 시뮬레이션 결과이다. 역기전력 파형의 크기와 주기가 일치함을 알 수 있고 또한, 이로부터 영구자석의 자화분포가 타당함을 알 수 있다. 그림 3은 1차측 권선에 전압을 인가하지 않은 상태에서 가동자의 이동 위치에 따른 detent force의 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이때의 힘은 Maxwell 응력법을 이용하여 구하였다. 결과에서 알 수 있듯이 detent force의 분포양상이 거의 일치함을 알 수 있으며, 크기는 약간의 차이를 보이고 있다. 이것은 실험에서 기계적인 마찰력등을 고려하지 않았기 때문이라 사료된다. 그림 4는 이때의 normal force에 대한 시뮬레이션 결과값을 나타낸다. 시뮬레이션에서는 식(6)의 1차측 권선저항을 매우 크게 입력하여 권선전류가 영이 되게 하였다.



(a) 실 측치



(b) 시뮬레이션

그림 2. 역기전력 파형

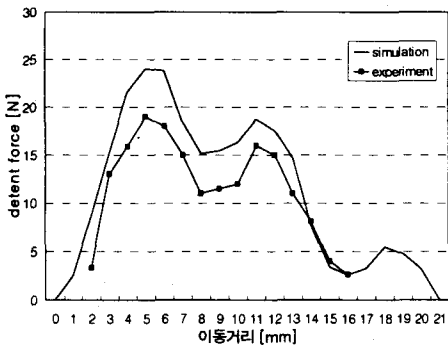


그림 3. Detent force

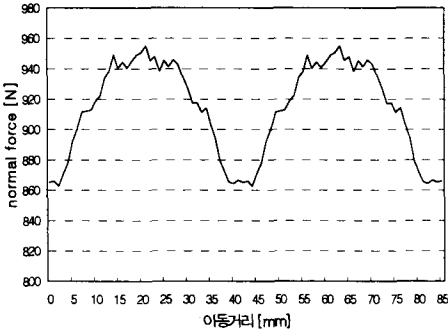


그림 4. Normal force

그림 5-6은 전압 7[V], 주파수 3[Hz], 부하 5[N]에서의 속도, 추력 응답 특성 곡선을 나타낸다. 속도는 약 4초 후에 동기속도인 0.25 [m/sec]로 수렴함을 알 수 있다. 추력은 기동시 최고 70[N]의 크기를 가지며 부하 5[N]으로 수렴함을 알 수 있다.

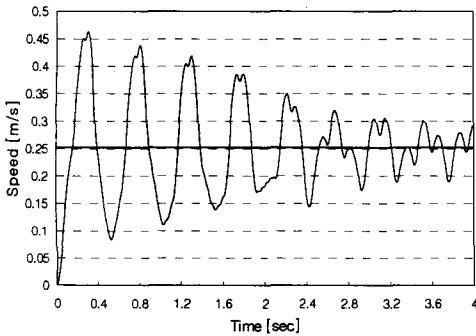


그림 5 속도 응답 곡선

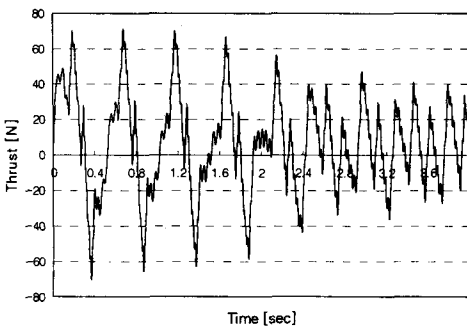
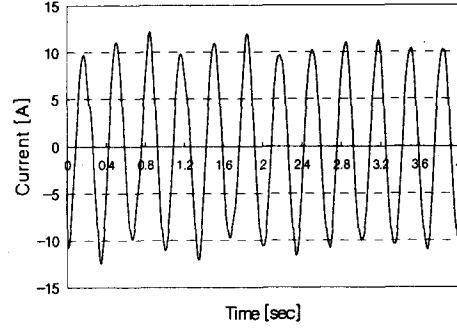
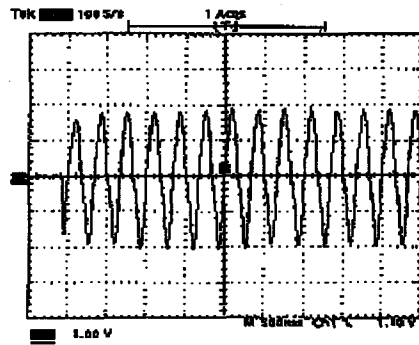


그림 6 추력 응답 곡선

그림 7은 일차측 전류에 대한 시뮬레이션 및 실험에 대한 파형이다. 전류 응답이 지령 주파수인 3[Hz]로 각각 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) 시뮬레이션



(b) 실험 (세로축:5A/div. 가로축:0.5sec/div.)
그림 7 일차측 전류

4. 결론

본 논문은 2차원 유한 요소법과 moving mesh 기법을 이용하여 2차측에 도체판을 갖는 영구자석형 선형 동기 전동기의 특성 해석에 대하여 설명하였다. 설계, 제작한 200W급 시작기의 detent force, 역기전력을 각각 측정하여 시뮬레이션과 비교하였고, V/f 일정시에 도체판과 back iron에서의 비동기시에 발생하는 와전류를 고려한 시뮬레이션을 통하여 전동기의 동특성을 고찰하였다. 각각의 결과로부터 해석의 타당성을 검증할 수 있었으며, 속도 및 위치 제어시 정확한 시뮬레이션의 가능성을 확인 할 수 있었다.

(참고 문헌)

- [1] B.I.Kwon, K.I.Woo, S.H.Rhyu, S.C.Park, "Dynamic Characteristic Analysis of an Inverted-Fed PMLSM with the Conductive Sheet Secondary", IEEE CEFC'98, 1998.6.
- [2] Tsutomu Mizuno, Hajime Yamada, "Magnetic circuit of a Linear Synchronous Motor with Permanent Magnets", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28, No.5, pp.3027-3029, 1992.
- [3] Gieras, Jack F., SPANNENBERG, Alfred, WING, Mitchell, "Analysis of a Linear Synchronous Motors with Buried Permanent Magnets", Proc. of LDIA, pp.323-326, 1995.