

이동을 고려한 편측식 선형 유도 전동기의 특성 해석

*임 달 호, *권 병 일, **김 창 업, *정 용 배
* 한양대학교 전기공학과, ** 효성중공업 기술연구소

Characteristic Analysis Of A Single-Sided Linear Induction Motor Taking account of Movement

*D. H. Im, *B. I. Kwon, **C. E. Kim, *Y. B. Jung
* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University
** R&D Institute, Hyosung Industries Co., Ltd.

Abstract - This paper presents the dynamic analysis method of a linear induction motor by finite element method. For simulation of dynamic performance, a step by step process with respect to time is used with external voltage source and motional equation. Movement is taken into account by a combination of mesh distortion and remeshing technique.

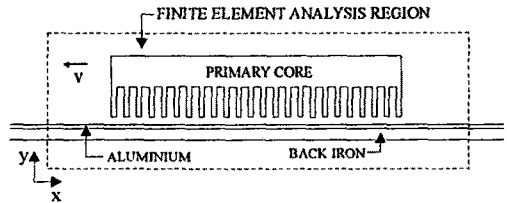


그림 1. SLIM의 2차원적 해석 모델

1. 서론

선형 유도 전동기는 직선운동을 필요로 하는 여러 산업 분야에 응용되어져 왔으며, 특히 가변속 제어에 사용할 때에는 순시 특성을 얻을수 있는 과도현상 해석이 필요하게 된다. 선형 유도 전동기의 과도현상 해석에는 등가회로를 사용하는 방법[1]과 전자장 수치해석에 의한 방법[2] 등의 예가 있다.

본 논문에서는 유한요소법을 사용하여 단일차형 편측식 선형 유도 전동기 (SLIM : Single-Sided Linear Induction Motor)의 동특성을 해석하였다. 유한요소 해석영역의 전자장 방정식과 외부 회로 방정식을 결합하였고, 해의 시간적 변화는 시간차분법을 적용하였으며, 동특성 해석을 위하여 운동방정식을 사용하였다. 또한 유한요소법을 적용할 경우 고정좌표계만을 사용하여 이동을 표현하면 계수행렬의 비대칭성으로 인하여 계산시간이 증가하기 때문에 본 논문에서는 이동자 측은 이동좌표계를 사용하였다. 본 해석 방법에 의하여 SLIM의 추력, 수직력 등의 특성을 계산하였다.

해석영역에서 \vec{A} , \vec{J}_e 및 \vec{J}_s 는 z 방향 성분 만 존재한다고 가정하고 2차원적으로 해석하였다. 본 해석대상의 SLIM은 저속 용이어서 유한요소 영역 밖의 부분에서의 자기장은 무시할수 있으므로 해석영역의 최외각 경계에는 $\vec{A} = 0$ 의 경계조건을 부여하였다. 또한 2차축이 균일, 대칭적 이므로 $\nabla\phi$ 항은 무시하였다.

SLIM에서 각 상의 회로 방정식은 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$u = Ri + L_o \frac{di}{dt} + E \quad (3)$$

여기서,

- u : 각 상의 외부 입력 전압 ; R : 각 상의 권선 저항 ;
- L_o : 각 상의 end coil의 누설 인덕턴스 ;
- E : 유한요소 해석영역의 각 상의 역기전력 ;
- i : 각 상의 전류.

식(1)은 Galerkin 법을 사용하여 유한요소 영역에 이산화 시키고 식(3)은 벡터 포텐셜과 전류와 외부전압 사이의 관계를 사용하여 식(1)과 함께 결합한다[3]. 최종적으로 얻어진 대수방정식에서 해의 시간적 변화는 후회 차분법을 사용하여 각 시간 간격마다 풀어서 해를 구한다.

2. 해석 방법

2.1 전자장 방정식과 회로 방정식

변위 전류를 무시할수 있는 준정상상태에서, 그림 1과 같은 해석대상 영역의 자기 벡터 포텐셜을 나타내는 전자장 방정식은 다음과 같다.

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_e + \vec{J}_s \quad (1)$$

$$\vec{J}_e = -\sigma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v} \times \vec{B} + \nabla \phi \right) \quad (2)$$

여기서,

- \vec{A} : 자기 벡터 포텐셜 ; \vec{J}_e : 입력 전류 밀도 ;
- \vec{J}_s : 유도된 와전류밀도 ; \vec{B} : 자속 밀도 ;
- μ : 재료의 투자율 ; σ : 재료의 도전율 ;
- \vec{v} : 이동자의 속도 ; ϕ : 전기 스칼라 포텐셜.

2.2 이동의 표현

일반적으로, 자기장 안에서 움직이는 도체가 있는 경우를 해석하기 위해서는 1차축에 고정된 좌표계만을 사용하거나[4], 1차축에 고정된 좌표계와 2차축과 같이 움직이는 이동좌표계를 함께 사용하는 방법[5]이 있다. 계산 시간과 해의 정확성의 관점에서 볼때, 과도상태를 해석할 경우에는 이동좌표계를 함께 사용하는 방법이 더 효과적인 것으로 알려져 있다[6]. 표 1에 두좌표계의 비교를 나타내었다. 본 논문에서는 이동좌표계를 함께 사용하여 해석하였으며, 이때 식(2)는 다음 식(4)처럼 나타낼수 있다.

표1. 과도상태에서의 이동, 고정 좌표계의 비교

coordinate system	coefficient matrix	computer storage	CPU time	accuracy
moving	symmetric	small	short	good
fixed	unsymmetric	big	long	bad

$$J_c = -\sigma \frac{dA}{dt} \quad (4)$$

실제로는 1차축이 이동하지만 해석의 편의를 위하여 2차축이 반대방향으로 이동하는 것으로 간주하였다. 이동좌표계를 사용할 경우에는 움직이는 쪽의 유한요소를 움직인 거리만큼 이동시킬때 요소의 재분할을 짧은 시간동안 효율적으로 하기위해서 다음과 같은 방법을 사용한다[7]. 먼저 운동방정식으로부터 시간간격 마다 움직인 거리를 구한다음, 이 거리만큼 이동자축의 유한요소들의 형상은 유지시키면서 그림2.(b) 처럼 이동시켜 준다. 이동후의 고정자축과 이동자축 사이의 이동을 표현해주는 요소층이 심하게 변형될 경우에는 그림2.(c) 처럼 가장 가까운 절점들끼리 연결해주는 부분적인 재요소분할을 행한다. 또한 그림2.(c) 처럼 이동자 축의 오른쪽 끝에 있는 절점 (r)은 유한요소법으로 해석하는 영역을 벗어난 것으로 간주하고 없애지며, 이동자축의 왼쪽 끝에서는 유한요소해석 범위내로 들어오는 도체를 나타내주기 위해 절점 (a') 을 새로 만들어 주는 방법을 사용한다. 본 방법을 사용할 경우 짧은 시간동안 요소의 재분할을 효과적으로 할수 있으며 그림2.(b) 에서와 같이 요소의 변형에 의한 오차를 줄이기 위해서 이동을 표현해주는 층의 요소를 되도록 많이 나누어 주었다.

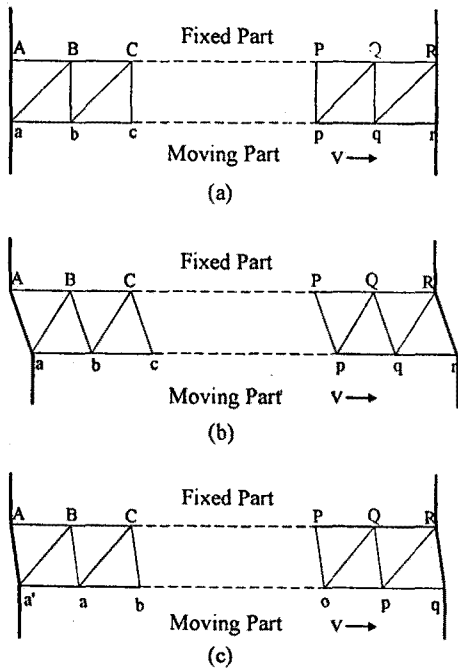


그림2. 이동을 나타내주는 요소층의 움직임

2.3 추력과 수직력의 계산

SLIM 에 작용하는 전자력은 Maxwell 용력[8] 을 이용하여 각 시간간격 마다 추력 F_x 와 수직력 F_y 을 다음식에 의하여 구하였다.

$$F_x = \int_l \frac{w}{2\mu_0} ((B_x^2 - B_y^2)n_x + 2n_x B_x B_y) dl \quad (5)$$

$$F_y = \int_l \frac{w}{2\mu_0} ((B_y^2 - B_x^2)n_y + 2n_x B_x B_y) dl \quad (6)$$

여기서 n_x 와 n_y 는 적분경로에 수직한 단위벡터 이며, w 는 1차철심의 적층폭이다. 공극에서 힘을 계산하기 위해 각각 서로 다른경로를 세군데 선정하여 각각의 경로에 작용하는 힘을 구한 후 이의 평균치를 SLIM에 작용하는 힘으로 계산하였다.

2.4 운동 방정식

SLIM의 움직임을 표현할 운동방정식은 수직력이 전 운전영역에서 항상 흡인력으로 작용할 경우 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$(m+M) \frac{dv}{dt} = F_x - k_f [(m+M)g + F_n] \quad (7)$$

여기서,

- m : 1차 가동부의 질량; M : 부하의 질량;
- k_f : 마찰 계수; g : 중력 가속도;
- v : 이동 속도.

3. 동특성 해석 결과

이상과 같은 방법으로 운전상태에서의 SLIM의 동특성을 해석해 보았다. 표2 는 SLIM의 제원을 나타낸다.

표2. SLIM의 제원

1차축 길이	198.5mm	상수	3
1차축 적층폭	80 mm	극 간격	51 mm
1차축 높이	49 mm	공극	2.5 mm
슬롯 폭	5.5 mm	알루미늄 두께	2 mm
태극매상 슬롯수	2	Back iron 두께	12 mm

그림3 은 3상 정현파 전압이 시작 $t = 0$ 인 순간에 SLIM에 인가되었을때, 마찰력을 무시한경우 시간에대한 추력, 수직력, 속도, 변위의 계산 결과를 나타낸다. 인가된 전압은 220Volt, 60Hz 로 하였고, 시간차분 계산상의 시간간격은 한 주기를 40 번 나누었으며, 이때의 시간간격은 약 0.417 (millisecond)이다.

그림3.(a) 로부터 시간에 대해서 속도가 증가하므로 추력은 감소하며 수직력은 증가하는 SLIM의 특성을 알수있다. 그림3.(b) 에서는 속도가 정상상태에 도달했을 때의 경우에도, 단부 효과에 의해 추력과 수직력이 전원 주파수의 2배의 주파수로 맥동함을 보여준다. 그림3.(c)는 슬롯에 대한 추력곡선으로 이로부터 SLIM이 동기속도 이상에서도 단부 효과로 인해 추력을 발생함을 알수있다. 그림3.(d) 에서는 시간에 대한 속도와 변위가 나타나 있다.

그림4는 마찰력을 고려하여 계산한 경우이며 수직력을 포함한 경우와 수직력을 고려하지 않은 경우의 시간에 대한 추력의 계산결과를 나타낸다. 각각의 경우 추력이 마찰력과 같은 크기가 될때까지 감소함을 나타내고 있으며, 마찰력을 계산할시 수직력을 고려해야 함을 보여주고 있다.

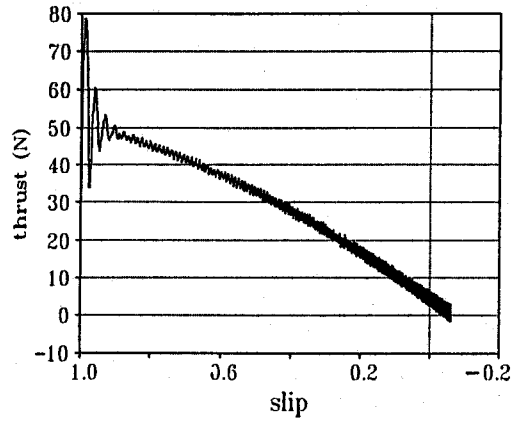
4. 결론

본 논문에서는 단일차형 편축식 선형 유도 전동기의 동특성을 계산하기 위하여 유한요소법과 운동방정식을 사용하였고, 유한요소법을 적용할 경우 이동좌표계를 사용함으로써 계수행렬의 대칭성과 sparsity 를 유지하여 계산시간을 절약할수 있었다. 본 해석 방법에 의하여 SLIM의 순시특성을 계산할수 있었다.

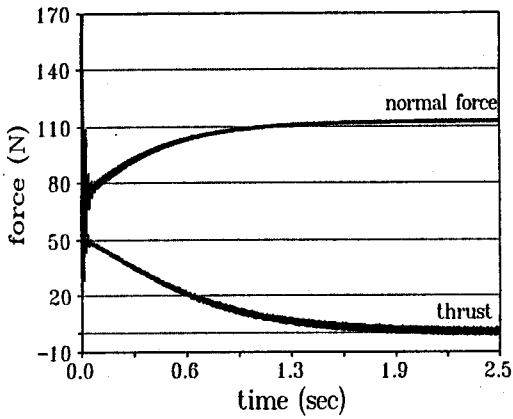
참 고 문 헌

- [1] T.A.Lipo, T.A.Nondahl "Pole-by-Pole d-q model of a Linear Induction Machine", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-98.

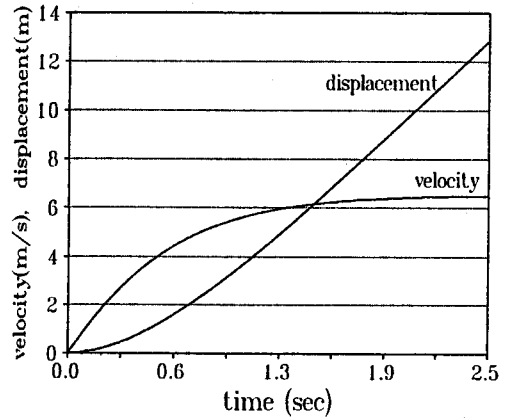
- [2] T.Onoki, H.numata, T.Yamamura : "Thrust Control of Linear Induction Motor by Detection of Magnetic Field", T.IEE Japan, vol.110-D, No.9, 1990
- [3] T.Nakata, N.Takahashi : "Direct Finite Element Analysis of Flux and Current Distribution Under Specified Conditions", IEEE Trans. Mag. vol.18, No.2, March 1982
- [4] A.R.Eastham, K.Ananthasivan, G.E.dawson and R.Ong : "Linear Induction Motor Design and Performance Evaluation by Complex Frequency and Time Stepping Finite Element Methods", ICEM July 8-11, 1986
- [5] N.Burais, A.Foggia, A.Nicolas, J.P.Pascal, J.C.Sabonnadiere : "Numerical Solution of Eddy Currents Problems Including Moving Conducting Parts", IEEE Trans. Mag. vol.20, No.5, September, 1984
- [6] K.Muramatsu, T.Nakata, N.Takahashi, K.Fujiwara : " Comparison Of Coordinate Systems For Eddy Current Analysis in Moving Conductors ", IEEE Trans. Mag. vol.28, No2 , March 1992
- [7] B. Davat, Z. Ren and M. Rajoi-Mazenc, "The Movement in Field Modeling", IEEE Trans. Mag. vol.21, pp.2296-2298, 1985
- [8] K.Reichert, H. Freundl and W.Vogt, "The Calculation of Forces and Torques within Numerical Magnetic Field Calculation Method", COMPUMAG, 1976



(c) 추력 대 슬립

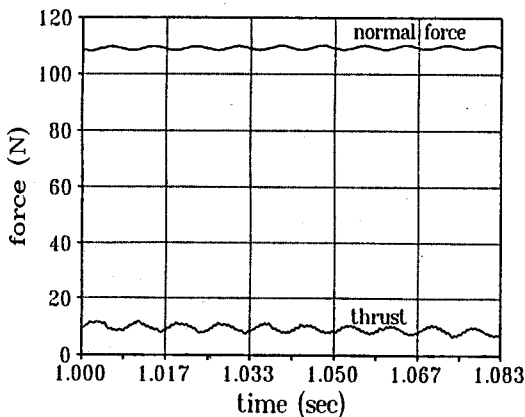


(a) 추력과 수직력



(d) 속도와 변위

그림3. 마찰력을 무시한 경우의 시간에 대한 SLIM의 추력, 수직력, 속도, 변위의 계산값



(b) 추력과 수직력의 맥동

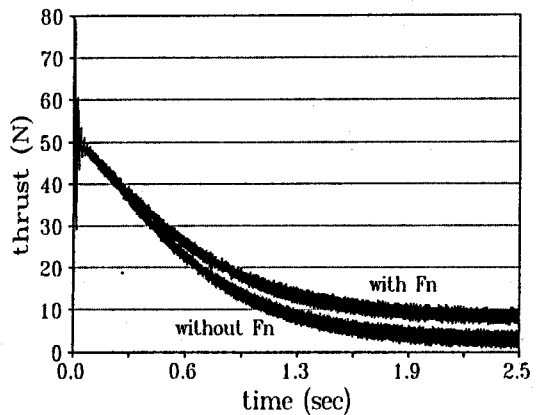


그림4. 마찰력을 고려할 경우 수직력의 영향