맴돌이 자속의 영향을 고려한 철도차량용 선형유도전동기의 추력 특성 연구

Thrust Characteristics Analysis considering the effect of the loops of flux in a LIM for Railway Transit

박찬배* 이형우* 한경희** 이병송* 권삼영* 박현준*
Chan-Bae Park Hyung-Woo Lee Kyung-Hee Han Byung Song Lee Sam-young Kwon Hyunjune Park

ABSTRACT

In the case of Linear induction motor(LIM), numerical analysis method like Finite Element Method(FEM) has been mainly used to analyze the travelling magnetic field problem which includes the velocity-induced electromotive force. If the problem including the velocity-induced electromotive force is analyzed by FEM using Galerkin method, the solution can be oscillated according to Peclet Number, which is determined by conductivity, permeability, moving velocity and size of mesh. Consequently, the accuracy of the solution can be low and the Loops of flux can be occurred at the secondary back-iron. These loops of flux occurred at the secondary back-iron does not exist physically, but it can be occurred in the analysis. In this case, the loops of flux can be generally removed by using Up-Wind method which is impossible to apply a conventional S/W tool(Maxwell 2D). Therefore, in this paper, authors examined the Loops of flux occurred at the secondary back-iron of LIM according to variations of Peclet Number, and analyzed whether these loops of flux affect on the thrust force characteristics of LIM or not.

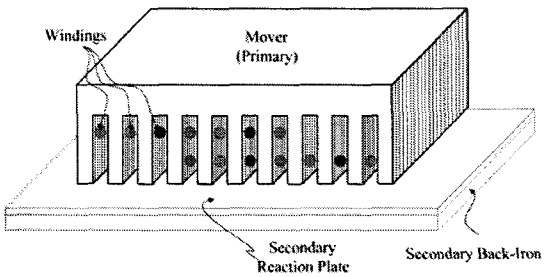
1. 서 론

선형유도전동기를 추진 시스템으로 채택한 대표적 철도응용 분야는 자기부상열차와 리니어 지하철 및 경전철 분야이며, 그림 1.(2)는 철도차량의 하부에 부착된 선형유도전동기를 보여준다. 회전형 전동기를 이용하여 기계적인 추진력을 기어와 바퀴로 전달하여 레일 위를 달리는 기존의 시스템에서 발생하는 여러 가지 문제점들을 개선하기 위하여 동력변환장치 없이 직선 추진력을 직접 얻을 수 있는 선형 유도전동기를 이용한 철도응용 분야에 관심을 두고 지속적인 연구 및 상용화가 진행되고 있다.

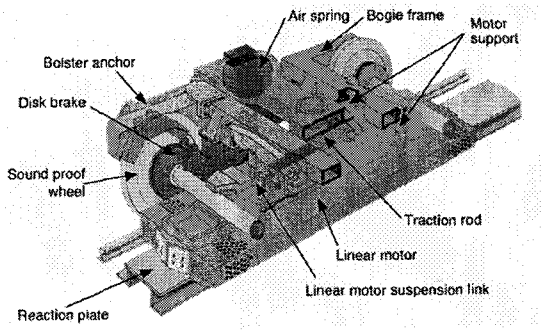
일반적으로 선형유도전동기는 구조상으로 1차측 길이방향이 유한하여 입, 출구단에서의 자속이 불균형하게 되는 종방향 단부효과와 1차측 이동자계에 의해 2차측에 유기되는 와전류 성분 중 추력를 발생시키지 못하는 성분이 존재하기 때문에 유효 공극 길이의 증가와 자속의 왜곡 등을 유발시키는 횡방향 단부효과가 발생하게 된다. 또한 1차측과 2차측 사이에서 수직력도 발생하게 된다. 그러므로 선형유도전동기를 정확히 해석하기 위해서는 이들 현상들이 모두 명확하게 고려되어야 하며, 선형유도전동기와 같은 속도기전력을 포함하는 운동자계 문제를 해석하기 위해서 유한요소법과 같은 수치해석적인 방법이 주로 이용되고 있다. 하지만 속도기전력을 포함하는 운동자계 문제를 Galerkin 법을 이용하는 유한

* 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부, 정회원
E-mail : cbpark@krri.re.kr
TEL : (031)460-5427 FAX : (031)460-5459
** 동국대학교, 전기공학과, 학생회원

요소법으로 해석할 경우, 도전율, 투자율, 이동 속도 및 요소의 크기에 따라 결정되는 Peclet Number에 따라 해가 오실레이션 할 수 있으므로 해의 안정성이 떨어지게 되고, 2차측 Back-iron에서 자속의 맴돌이 현상이 발생되게 된다 [1,4]. 이때 2차측 Back-iron에서 발생하는 자속의 맴돌이 현상은 물리적으로는 존재하지 않는 것이지만, 유한요소법에 의한 해석에서는 발생이 가능하다. 이 경우, 일반적으로 Up-wind 기법을 이용하여 자속의 맴돌이 현상을 해결하게 되는데, 범용 S/W Tool(Maxwell 2D)의 경우 Up-wind 기법을 적용하기가 힘들다. 따라서 본 논문에서는 Peclet Number에 따른 선형유도전동기의 2차측 Back-iron에서 발생하는 자속의 맴돌이 현상을 살펴보고, 자속의 맴돌이 현상이 선형유도전동기의 추력특성에 얼마나 영향을 주는지를 분석하였다.



(1) 선형유도전동기의 형상



(2) 철도 차량에 적용한 선형유도전동기 [5]

그림 1. 선형유도전동기

2. 운동자계 문제 해석기법

일반적으로 2차원 운동자계를 포함한 와전류 문제에서, 유기전류 영역에 대한 2차원 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial y}\right]=-J_0+\sigma\left[v_x\frac{\partial A}{\partial x}\right] \tag{1}$$

여기서, A는 z 방향 자기벡터 포텐셜을 나타내고, J_0는 여자전류밀도, σ 는 도전율, μ 는 투자율, v_x 는 선형유도전동기의 x 방향으로의 이동속도이다.

운동자계를 포함한 와전류 문제를 Galerkin 법에 의한 유한요소 해석을 할 경우, 각각의 요소에 대한 Peclet Number가 단위값을 초과하게 되면 해가 불안정해지는 문제가 있다. 대부분의 실제 문제의 경우, Peclet Number는 단위값을 초과하기 때문에, 자기벡터 포텐셜 값의 오실레이션을 피하기 어렵다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 Up-Wind 법을 사용하며, 식 (1)을 Up-Wind 법에 의해 정식화하면 식 (2)와 같다.

$$\int_{S_e}\sum_{1}^{4}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial L_i}{\partial x}\frac{\partial N_j}{\partial x}+\frac{1}{\mu}\frac{\partial L_i}{\partial y}\frac{\partial N_j}{\partial y}\right)A_j\,ds+\sigma v_x\int_{S_e}\sum_{1}^{4}\left(L_i\frac{\partial N_j}{\partial x}\right)A_j\,ds+J_0\int_{S_e}L_i\,ds=0 \tag{2}$$

여기서, N_i 는 형상함수이고, L_i 는 Up-Wind 보간함수이며, 식 (3), (4) 로 정의할 수 있다. P_e 는 Peclet Number로써 식 (7)과 같으며, h 는 x 방향으로의 요소의 크기이다 [1-3].

$$N_i=\frac{1}{4}(1+\xi_i\xi)(1+\eta_i\eta) \tag{3}$$

$$L_i=\frac{1}{4}(1+\xi_i\xi-\alpha\,\xi_i\,f(\xi))(1+\eta_i\eta) \tag{4}$$

$$f(\xi)=3(1-\xi^2)/4 \tag{5}$$

$$\alpha=\coth\left(\frac{P_e}{2}\right)-\frac{2}{P_e} \tag{6}$$

$$P_e=\sigma\mu v_x h \tag{7}$$

3. 범용 S/W Tool을 이용한 선형유도전동기의 해석 모델

범용 S/W Tool(Maxwell 2D)를 이용하여 선형유도전동기의 운동자계 문제를 해석할 경우, Up-Wind 법을 적용하기가 어렵다. 따라서 선형유도전동기의 추력특성을 해석하기 위해서 Galerkin 법을 적용하고 요소의 Peclet Number의 크기를 줄이는 방법을 적용하였다. 해석 모델은 3상 8극을 가지는 선형유도전동기로써, 선형유도전동기의 단부효과를 고려하기 위해서 형상 전체를 모델링 하였다. 해석 모델의 정의는 그림 2와 같다. 전체 모델의 크기가 너무 커서 작은 Peclet Number를 갖도록 2차측의 요소를 나누는데 한계가 있었으며, 이에 따른 Peclet Number가 209 와 626인 두 가지 경우에 대한 모델의 요소 분할을 실시하였다. 도표 1은 두 가지 해석 모델의 Peclet Number를 계산한 결과를 보여준다.

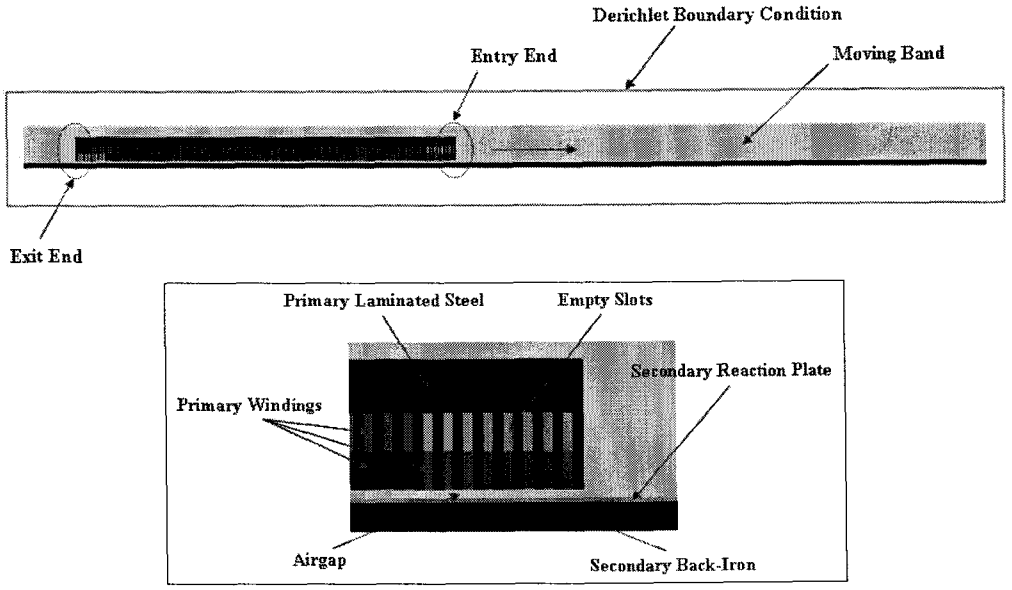


그림 2. 선형유도전동기의 해석 모델

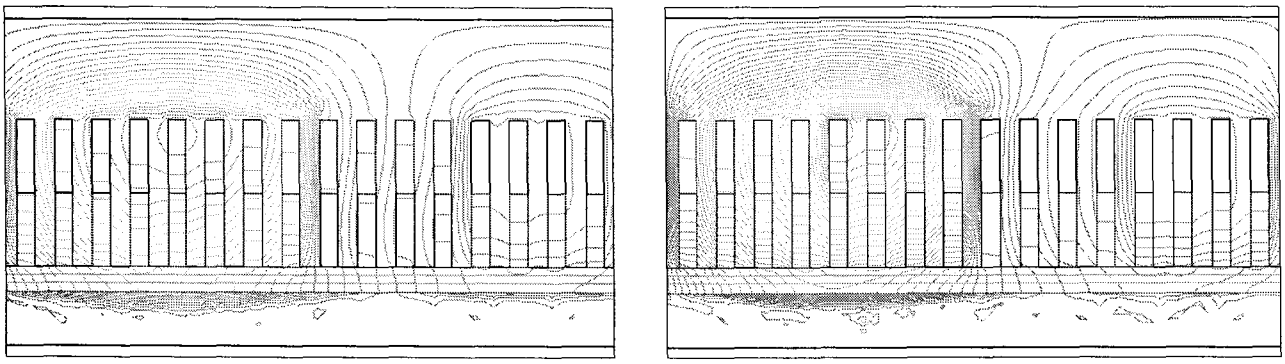
도표 1. 해석 모델의 Peclet Number

	Model 1	Model 2
도전율 (σ)	1 x 10^6	1 x 10^6
이동속도 (v_x)	8.3 m/s	8.3 m/s
요소의 크기 (h)	5 mm	15 mm
Peclet Number (P_e)	209	626

4. 해석 결과 및 검토

그림 3은 두 가지 경우에 대한 해석 모델의 2차측 Back-Iron 에서의 비정상적인 자속의 맴돌이 현상을 보여준다. 선형유도전동기에 있어서, 1차측에 의해 발생한 시간-공간 변화 자계는 공극을 지나서 2차측에 기전력을 유기시킨다. 그림 3에서 보듯, 2차측 Back-Iron에서 발생한 비정상적인 자속의 맴돌이 현상은 실제 물리적으로 발생하는 현상은 아니고, Galerkin 법에 의한 유한요소법을 이용할 때, 요소들 사이의 인접한 절점사이에서 자기벡터포텐셜이 오실레이션 하기 때문에 일어나는 현상이다. 그림 3.(1)은 Time-step이 작고, 요소수가 많은 Model 1에서의 2차측의 자속분포를 보여주며, 그림 3.(2)는 Time-step이 크고, 요소수가 적은 Model 2에서의 2차측의 자속분포를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, Model 2에 비해 Model 1에서 자속의 맴돌이 현상이 줄었지만, Peclet Number가 단위값 보다 여전히 크기 때문에 자속의 맴돌이 현상이 존재함을 알 수가 있다. 그림 4는 해석 모델의 Back-Iron에서의 자기벡터포텐셜 분포를 보여준다. 그림 4를 살펴보면, Model 2에서의 자기벡터 포텐셜 값의 오실레이션

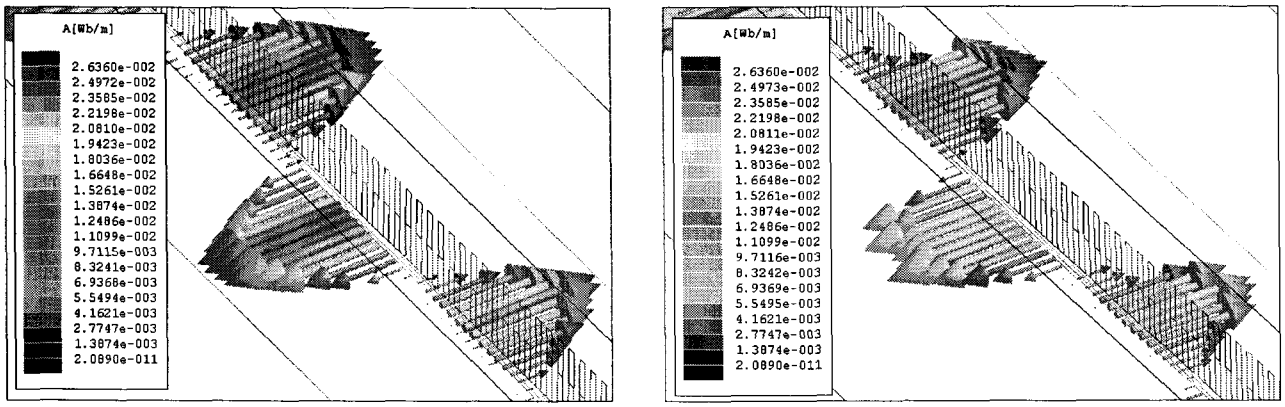
이 Model 1에서의 오실레이션 보다 큼을 알 수 있다. 그림 5는 과도해석에 의한 선형유도전동기 모델의 발생 추력을 보여준다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이, Model 1과 Model 2 사이의 발생 추력의 크기는 유사하다. 회전형 기기에 비하여 큰 공극을 갖는 선형유도전동기의 경우, 자속의 맴돌이 현상이 발생 추력에 크게 영향을 끼치지 않음을 본 시뮬레이션 결과를 통하여 알 수 있었다. 도표 2는 두 해석 모델의 시뮬레이션 결과를 보여준다.



(1) Time-step이 작고 요소수가 많은 Model 1 (Peclet Number = 209)

(2) Time-step이 크고 요소수가 적은 Model 2 (Peclet Number = 626)

그림 3. Peclet Number에 따른 2차측 Back-Iron에서의 맴돌이 자속 분포



< Model 1 > < Model 2 >

그림 4. 선형유도전동기의 Back-Iron에서의 자기벡터포텐셜 분포

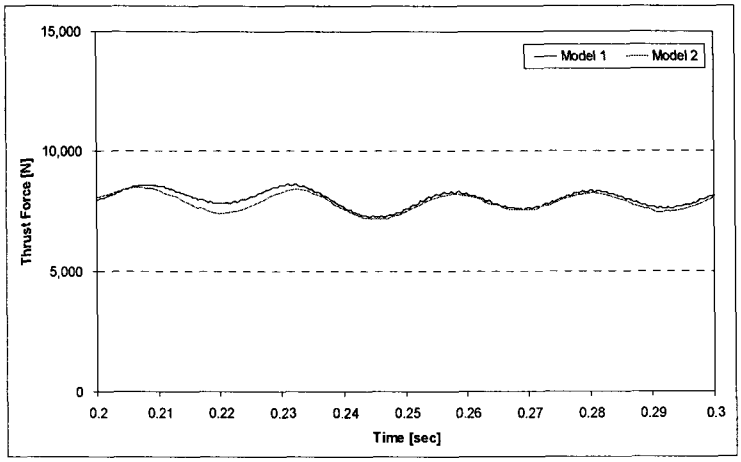


그림 5. 선형유도전동기 모델의 정상상태에서의 발생추력

도표 2. 해석 모델의 시뮬레이션 결과 비교

	Model 1	Model 2
Boundary Condition	Periodic, Neumann	Derichlet
Mesh	44,327	21,139
Time step	0.00033	0.001
Thrust force	Around 7,850 [N]	Around 7,800 [N]

5. 결론

속도기전력을 포함하는 운동자계 문제를 유한요소법으로 해석할 경우, Peclet Number를 고려한 Up-wind 기법을 적용하는 것이 효과적이지만, 범용 S/W Tool (Maxwell 2D)을 이용할 경우 Up-wind 법을 적용하기가 힘들다. 따라서 본 논문을 통해서, 선형유도전동기의 추력특성 해석을 위해 Galerkin 법을 사용하면서 요소의 Peclet Number의 크기를 줄이는 방법을 적용하였다. Peclet Number에 따른 선형유도전동기의 2차측 Back-iron에서 발생하는 자속의 맴돌이 현상의 영향도를 살펴보았으며, 추력 계산을 수행하였다. 결론적으로, 자속의 맴돌이 현상이 선형유도전동기의 추력특성에는 크게 영향을 주지 않음을 시뮬레이션 결과를 통해서 알 수 있었다.

참고문헌

1. 한필완, 이주(1999), "운동자계문제의 해석을 위한 유한요소법에 관한 연구", 대한전기학회, 하계학술대회 논문집, pp.76-78
2. M. Ito, T. Takahashi, M. Odamura(1992), "Up-Wind Finite Element Solution of Traveling Magnetic Field Problems," IEEE Transaction on Magnetics, Vol.28.No.2,March,pp.1605-1610
3. Zheng Wang, Graham E. Dawson, and Tony R. Eastham(1994), "The Finite Solutions for Moving Conductor Eddy Current Problems Based on Triangular Elements," IEEE Transaction on Magnetics, Vol.30.No.6,Nov.,pp.4329-4331
4. I. Boldea and S. A. Nasar(2001), Linear motion electromagnetic devices, New York:Taylor&Francis
5. Japan Subway Association(2004), Linear Metro System, pp.1-28