

# 유한요소법에 의한 단1차 단2차 편측식 선형 유도전동기의

## 2차측 와전류 분포 해석에 관한 연구

임 달 호 김 학 변 조 운 현 김 동 진\*

한 양 대 학 교

A study on the secondary side eddy current distribution analysis of a short primary-short secondary single-sided LIM by the finite element method

Dalho Im Haklyun Kim Yunhyun Cho Dongjin Kim Hanyang University

### Abstract

In this paper, a short primary-short secondary single-sided LIM which is used as a driving source for automatic conveyor system, is selected as a analysis model.

And with a method for analyzing eddy current distribution and thrust force which are produced according to the relative position of primary and secondary, FEM in which current vector potential is introduced is adopted.

Also, analysis results are compared with experimental results, so propriety of this study is proved.

### 1. 서 론

지금까지 전기기기의 해석분야에 유한요소법을 도입한 이후로 기본적인 자속분포 해석에서부터 회전의 회전력 특성해석 및 기기의 등가회로 산정에 이르기까지 꾸준한 연구가 진행되어 왔다.

위의 방법은 주로 자기벡터 포텐셜을 이용하여 해석함으로써 유도기와 같이 와전류가 전체기기의 특성에 미치는 영향이 큰 기기 해석에 와류가 고려된 자속 분포 양상만으로 와류손 및 와전류 분포 양상을 직접 구할 수 없어 기기의 특성을 정확히 파악하기 어려웠다.

이에 따라 본 연구에서는 자동반송장치의 구동원으로 사용되는 단1차 단2차 편측식 선형유도전동기를 물벡터포텐셜을 도입하여 지배 방정식을 유도하였으며 이로부터 유한요소법을 적용하여 와전류 분포 및 추력 산정법을 제안하였다.

해석의 타당성을 입증하기 위하여 단1차 단2차 편측식 선형유도전동기의 1차측에 대한 2차측의 상대적 위치에 따라 계산한 추력치와 실험치로 비교 검토하였다.

본 연구 결과로 볼때 자동반송 장치용 선형유도전동기의 설계시에 와전류 분포 양상 및 위치제어에 필요한 시동 추력을 산정하는 경우에 기초자료로 이용될 수 있으리라 사료된다.

### 2. 해석 모델 및 가정

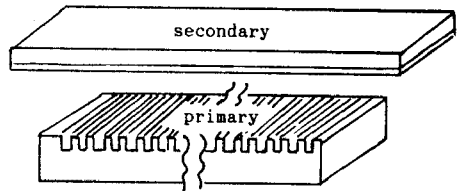


그림 1.a 단1차 단2차 편측식 선형유도전동기

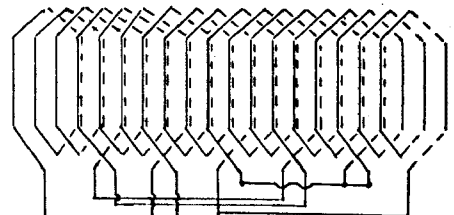


그림 1.b 권선도

그림 1.a는 자동반송장치의 구동용으로 사용된 단 1차 단2차 편측식 선형유도전동기의 해석 모델로 1차측은 여자코일과 고정자 철심으로 구성되어 있으며 2차측은 알루미늄 도체판과 Back iron으로 구성되어 있다.

그림 1.b는 해석 모델의 권선도로서 권선 방식은 2층권으로 상수 m=3, 극수 p=2, 매극 매상의 슬롯수 q=3 이다. 본 연구에서 2차측 알루미늄 도체에 유기되는 와전류 분포를 해석함에 있어서 Maxwell의 전자기방정식을 기초로 하여 기본방정식을 도출하기 위해 다음과 같은 가정을 두었다.

- 1) Al 도체판의 도전율은 일정하고 표피효과를 무시한다.
- 2) 2차측에 인가되는 입력자계는 Z축 방향의 성분만 갖는다.
- 3) 1차측과 2차 Back iron의 부자율은 무한대이며 누설자속은 무시한다.
- 4) 1차권선의 주변자속(fringe flux)은 무시한다.
- 5) Z축방향의 변위는 일정하다.

3. 기본 방정식

본 해석 모델의 편축식 선형유도전동기의 Air gap 내에 자계의 세기 H는 1차측의 여자전류 Js에 의해 발생하는 자계의 세기 Hs와 외부전류에 의하여 작용하는 자계의 세기 He와의 합성자계로 식(1)과 같다.

$$H = H_s + H_e \quad (1)$$

(1)식에서 Hs는 Biot-Savart법칙에 의해 다음식으로 주어진다.

$$H_s = \frac{1}{4\pi} \int \frac{J_s \times r_0}{r^2} dv \quad (2)$$

$r_0$ 는 Js로부터 Hs점까지의 거리 r에 대한 단위 방향 벡터이다. 2차측의 외부전류밀도  $J_e$ 는

$$\nabla \times H_e = J_e \quad (3)$$

$$J_e = \sigma (E_e + V \times B) \quad (4)$$

(3)식에 Divergence를 취하면

$$\nabla \cdot J_e = 0 \quad (5)$$

다음에 전류벡터포텐셜을  $\psi$ 로 정의하면

$$H_e - \nabla \psi = -\text{grad} \quad (6)$$

단,  $-\text{grad}$ 는 유도전류에 의한 자계 He의 기준을 정하기 위한 자계에 해당한다.

식(3)과 식(4)의 양변에 Curl을 취하면

$$\nabla \times \nabla \times \psi = \sigma \nabla \times E + \sigma \nabla \times V \times B \quad (7)$$

2차원상의 직각 좌표계에서 식(7)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \sigma \mu_0 \left[ \frac{\partial}{\partial t} (H_s + \psi_z) + V_x \frac{\partial \psi_z}{\partial x} \right] \quad (8)$$

(8)식으로부터 유한요소법을 적용함에 있어서 해석 영역을 1차 삼각요소로 분할하고 Galerkin이론을 적용하여 정리하면 요소Matrix식은 다음과 같다.

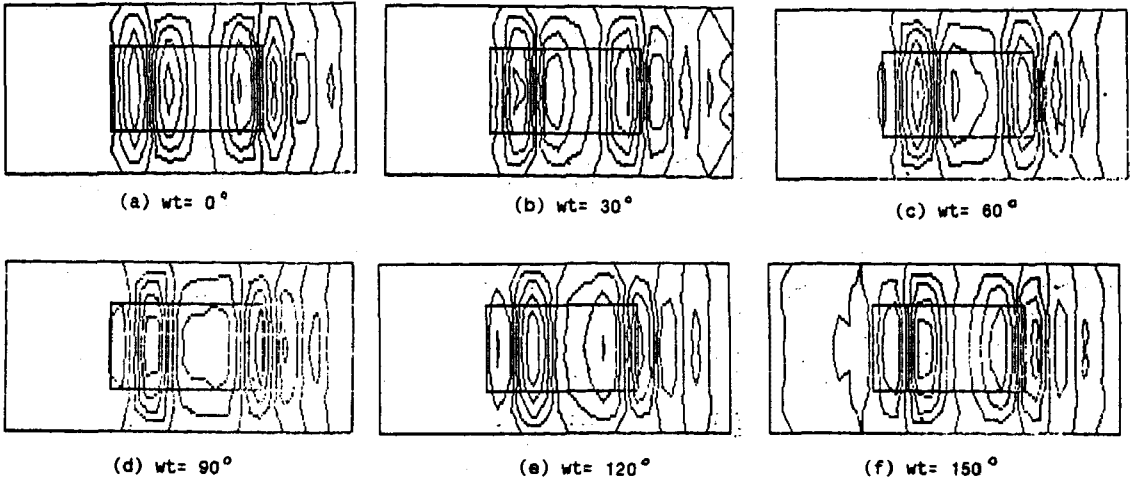


그림 2. 시간 변화에 따른 단1차 단2차 SLIM의 2차측 와전류 분포 양상 (Slip = 0.5)

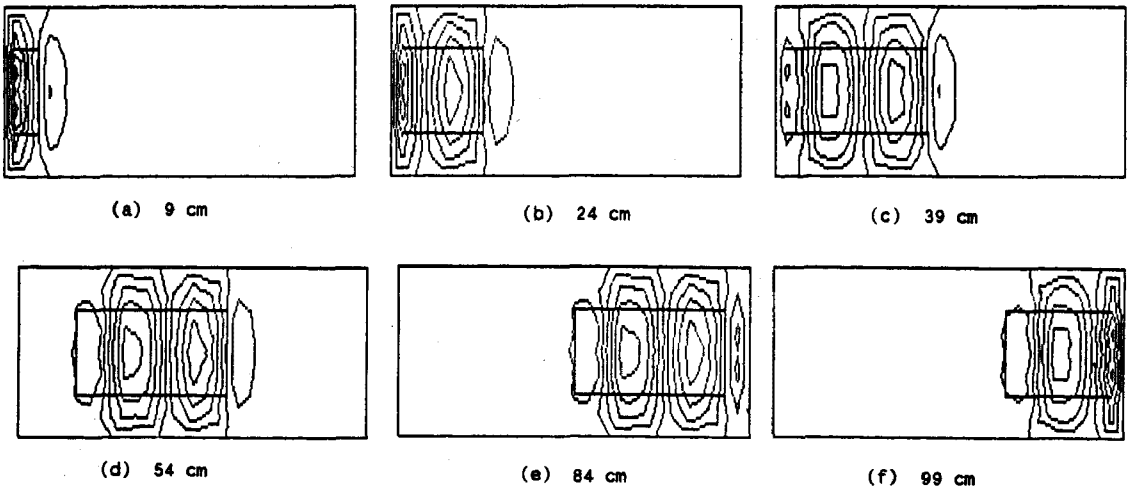


그림 3. 단1차 단2차 SLIM의 1차측에 대한 2차측의 진입길이에 따른 와전류 분포 양상

$$G_i = \frac{1}{4d\sigma} \begin{pmatrix} bb_1+c_1 & bb_2+c_2 & bb_3+c_3 \\ bb_1+c_1 & bb_2+c_2 & bb_3+c_3 \\ bb_1+c_1 & bb_2+c_2 & bb_3+c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_1^e \\ \psi_2^e \\ \psi_3^e \end{pmatrix} + \frac{\mu_0 d}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \frac{\partial H_0^e}{\partial t} \quad (9)$$

$$+ \frac{\mu_0 d}{12} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \psi_1^e \\ \psi_2^e \\ \psi_3^e \end{pmatrix} + \frac{\mu_0 V_0}{6} \begin{pmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ b_2 & b_3 & b_1 \\ b_3 & b_1 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_1^e \\ \psi_2^e \\ \psi_3^e \end{pmatrix}$$

식 (9)로부터 구한 전류벡터포텐셜치를 식 (10), (11)에 대입하면 각요소에 대한 전류성분을 얻을 수 있다.

$$j_x^e = \frac{\partial \psi^e}{\partial y} = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{2d^e} c_j \psi_j^e \quad (10)$$

$$j_y^e = - \frac{\partial \psi^e}{\partial x} = - \sum_{j=1}^3 \frac{1}{2d^e} b_j \psi_j^e \quad (11)$$

이로부터 2차축의 알루미늄 도체판의 전체에 작용하는 추력의 평균치는 Lorentz힘의 방정식에 의해 다음식으로 구해진다.

$$F = \text{Re} \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \sum_{x=0}^{x_0} \sum_{y=0}^{y_0} (j \times B) \right\}$$

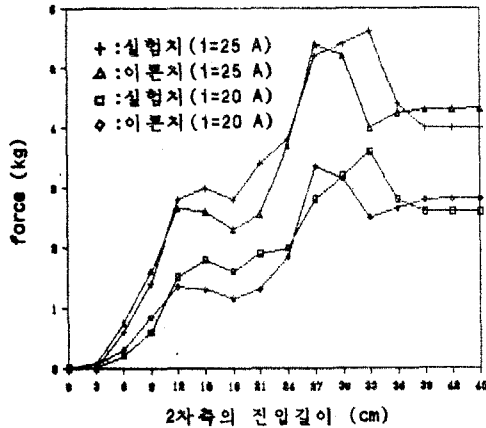


그림 4. 시동 추력 특성 곡선

4. 해석결과 및 검토

선형유도전동기의 설계시나 속도, 위치제어시에 시동 추력을 구할경우 먼저 2차도체판에 흐르는 와전류에 대하여 파악할 필요가 있다.

그림 2, 그림 3은 두께 5mm, 가로 세로의 길이가 88cm, 24cm인 알루미늄 도체판인 해석 모델에 전류벡터 포텐셜을 이용한 등포텐셜 선으로 곧 2도체판에 유도된 와전류 분포 상태를 나타낸 것이다. 그림 2는 단1차 단2차 편축식 선형 유도전동기의 1차 축을 고정된 상태에서 시간의 변화에 따른 2차축의 와전류 분포 양상이다. 그림 2의 와전류 분포 양상을 통하여 기존의 회전형 유도전동기와 달리 LIM의 구조상 단부가 존재함으로써 우수극과 기수극이 발생하는 현상을 확인할 수 있고 그림 2의 (a)~(f)를 통하여 1차축의 이동자계에 따라 2차축의 와전류 분포 양상의 변화를 볼 수 있다. 그림 3은 LIM의 1차와 2차의 상대위치에 따른 와전류 분포양상을 나타낸 것이고 그림 4는 그림 3과 같이 2차축이 1차축에 진입하는 길이에 따른 시동 추력 계산치와 실험치의 비교 그래프로서 2차축의 진입하는 길이가 증가함에 따라 시동 추력이 증가함을 알 수 있다.

5. 결 론

본연구의 해석결과를 통하여 단1차 단2차 선형유도전동기의 2차축 알루미늄 도체판위의 시간의 변화 및 1,2차 상대 위치에 따른 와전류 분포 양상을 알 수 있었다. 또한, 상대 위치에 따른 추력의 계산치와 실험치를 비교 검토한 결과 거의 유사한 양상으로 나타남을 확인할 수 있었다. 이상의 결과로 볼때 선형유도전동기를 사용하는 자동 반송 장치의 속도제어 및 위치제어를 할 경우나 전동기 설계시에 기본자료로 활용 가능 하리라 본다.

참고 문헌

- 1) Takao Takahashi, Kentaro Kurita, "computation of eddy currents induced in a conducting sheet under moving magnets", IEEE Trans. on magnetics, vol.24, No.1, 1988.2
- 2) Sakae Yamamura, "Theory of linear induction motors", John Wiley and Sons, 1979
- 3) S.A.Nasar, I.Boldea, "Linear motor electric machines", John Wiley and Sons, 1976
- 4) Kenneth H.Huebner and Earl A.Thornton, "The finite element method for engineers", John Wiley and Sons, 1976
- 5) 임달호, 김민수, 신홍교, "전류 벡터 포텐셜을 이용한 와류분포의 유향요소해석에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 1988.12

부 록

단1차 단2차 편축식 선형유도전동기 사양

명칭 / 수치		명칭 / 수치	
1차축	극간격 : 18(mm)	2차축	동기속도 : 28.8 m/s
	극수 : 2		부자율 : 4.4x10 <sup>-7</sup>
	도체수 : 25(31%)		두께 : 5(mm)
	공극 : 5(mm)		2차축크기 : 880x240
	전원주파수 : 60(Hz)		x5 (mm)
1차축크기 : 36x160	x2 (mm)	도전율 : 5.5x10 <sup>7</sup>	