

# 단1차 단2차 편측식 선형 유도전동기의 유한요소법에 의한 2차측 와전류 분포 해석에 관한 연구

## A Study on the Secondary Side Eddy Current Distribution Analysis of a Short Primary-Short Secondary Single-Sided LIM by the Finite Element Method

任 達 鎬\* · 曹 允 鉉\*\*

(Dal-Ho Im · Yun-Hyun Cho)

### 요 약

본 논문에서는 자동 반송장치의 구동원으로 사용되는 단1차 단2차 편측식 선형 유도전동기를 해석 모델로 택하였다. 그리고 1차측과 2차측의 상대적 위치에 따라 발생하는 와전류 분포 및 추력을 해석하기 위하여 전류 벡터 포텐셜을 도입한 유한 요소법을 채택하였다. 또한, 해석 결과를 실험치와 비교하여 본 연구의 타당성을 입증하였다.

**Abstract-** In this paper, a short primary-short secondary single-sided linear induction motor which is used as the driving source for an automatic conveyor system, is selected as an analysis model. The finite element method in which the current vector potential is introduced is adopted to analyze the eddy current distribution and thrust force which are produced according to the relative position of the primary and the secondary. Also, the analysis results are compared with experimental ones, to show the propriety of this model.

### 1. 서 론

현재 산업 분야의 생산 공정에 널리 사용되고 있는 반송 장치의 구동원은 대부분 회전형 전동기

로 벨트, 기어 및 롤러등 적당한 동력 변환 장치를 사용하여 회전 운동을 직선 운동으로 바꾸어 사용하는 간접구동 방식으로 동력 전달 효율이 좋지 않을 뿐만 아니라 보수, 점검 및 유지등이 어렵다.

따라서 이러한 직선 운동계에 직접 추력을 얻을 수 있는 선형전동기를 자동 반송장치에 이용하므로 구조가 간단해지고 보수, 점검이 용이하며 원심력에 의한 속도제한을 받지 않으므로 고속 반송이 가능하고 저소음성, 크리닝성(cleaning)등을

\*正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

\*\*正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 博士過程

接受日字 : 1989年 7月10日

1次 修正 : 1990年 2月12日

2次 修正 : 1990年 4月16日

얻을 수 있어 최근 여러 선진국에서 연구 개발이 활발히 진행 중이다.

선형 전동기는 기존의 회전형 전동기와 달리 구조상 1차측의 단부가 존재함으로써 생기는 end-effect와 transverse edge-effect가 실제 선형전동기의 특성에 중대한 영향을 미친다. [1~7]

이러한 현상을 고찰하기 위해 지금까지는 퓨우리에 급수, 퓨우리에 변환등 해석적인 방법으로 해석하거나 유한 요소법에 자기 벡터 포텐셜을 도입하여 해석함으로써 와전류 성분이나 고려된 자속분포 양상등은 알 수 있었으나 와전류 분포 양상은 알 수 없었다. [8~15]

이에 따라 본 연구에서는 자동반송장치의 구동원으로 사용되는 단1차 편측식 선형유도전동기의 1, 2차측의 단부의 존재로 생기는 end-effect와 transverse edge-effect가 고려된 2차측의 와전류 분포 양상을 보기 위하여 Maxwell의 전자방정식에 전류 벡터 포텐셜을 도입하여 지배방정식을 유도하였으며 이로 부터 현재 전기 기기의 수치해석 방법으로 널리 사용되고 있는 유한요소법을 적용하여 해석하였으며 추력 산정법을 제안하였다.

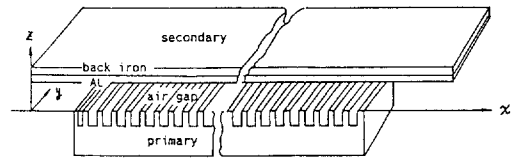
## 2. 해석 모델 및 가정

그림 1.a는 자동 반송 장치의 구동용으로 사용된 단1차 편측식 선형 유도 전동기의 해석 모델로 1차측은 여자코일과 고정자 철심으로 구성되어 있으며 2차측은 알루미늄 도체판과 Back iron으로 구성되어 있다.

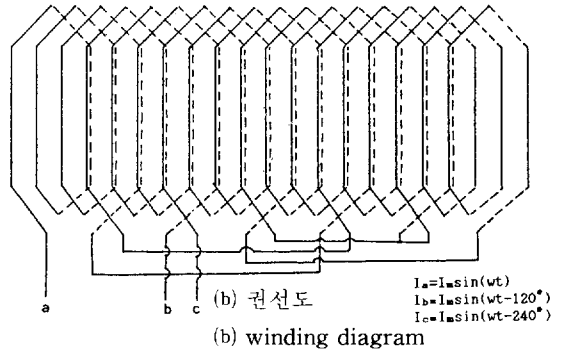
그림 1.b는 해석 모델의 권선도로서 권선 방식은 2층권으로 상수  $m=3$ , 극수  $p=2$ , 매극 매상의 슬롯수  $q=3$ 이다.

본 연구에서 2차측 알루미늄 도체판에 유기되는 와전류 분포를 해석함에 있어서 Maxwell의 전자방정식을 기초로 하여 기본방정식을 도출하기 위해 다음과 같은 가정을 두었다.

- 1) 2차측 알루미늄 도체판의 도전율은 일정하고 투자율은 공기중의 투자율과 같으며 포피효과를 무시한다.
- 2) 2차측에 인가되는 입력자계는 Z축 방향의 성분만 갖고며 유효공극의 길이는 기계적 공극길이에 Carter계수를 곱한 값으로 취한다. [1]
- 3) 1차측과 2차 Back iron의 투자율은 무한대이며 누설자속은 무시한다.
- 4) 1차권선의 주변자속(fringe flux)은 무시한다.



(a) 단1차 단2차 편측식 선형유도전동기  
(a) Short primary-short secondary single-sided LIM



(b) 권선도  
(b) winding diagram

그림 1 단1차 편측식 선형유도전동기와 권선법  
Fig. 1 Short-primary single-sided LIM and winding diagram

5) Y축 방향으로의 자계의 변화는 없다.

## 3. 기본 방정식 및 유한요소법의 적용

본 해석 모델의 편측식 선형 유도전동기의 Air gap내에 자계의 세기  $H$ 는 1차측 전류  $I_s$ 에 의한 자계의 세기  $H_s$ 와 2차측 알루미늄 도체판의 와전류에 의한 자계의 세기  $H_e$ 와의 합성자계로 식(1)과 같다.

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

식 (1)에서 1차 고정자 철심의 슬롯에 놓여 있는 미소코일  $dL$ 에  $I_s$ 가 흐를때 거리  $r$ 만큼 떨어진 점에서의 자계의 세기  $H_s$ 는 Biot-Savart 법칙에 의해 다음 식(2)로 주어진다. [16]

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

여기서  $r_0$ 는  $IS$ 로부터  $r$ 만큼 떨어진 거리에 대한 단위 방향 벡터이다. 전류 벡터 포텐셜을  $\Psi$ 라 정의하면 선형 유도 전동기의 2차측 와전류 밀도  $J_e$ 는 다음과 같다.

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

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

여기서  $\sigma$ 는 알루미늄판의 도전율이며,  $Be$ 는 와전류에 의한 자속밀도이다. 또한, 선형 유도 전동기의 2차측 와전류에 의해 유도되는 자계의 세기는 식 (5)와 같다.

$$\nabla \times He = J_e \quad (5)$$

식 (3)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 식 (6)이 된다.

$$\nabla \times (He - \Psi) = 0 \quad (6)$$

식 (6)으로부터 자기 스칼라 포텐셜  $Q$ 를 정의하면 식 (7)과 같이 놓을 수 있다.

$$He - \Psi = -\text{grad}Q \quad (7)$$

식 (3)과 식 (4)을 정리하여 Curl를 취하면 식 (8)과 같이 되며

$$\nabla \times \nabla \times \Psi = \nabla \times (\sigma E_e + \sigma V \times B) \quad (8)$$

식 (8)에 Faraday의 법칙 식 (9)을 대입하면 식 (10)과 같이 된다.

$$\nabla \times E_e = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (9)$$

$$\nabla \times \nabla \times \Psi = -\sigma \frac{\partial B}{\partial t} + \sigma \nabla \times V \times B \quad (10)$$

선형 유도전동기에 있어서 1차측 고정자에서 가해진 입력자속에 의해 2차측에 유도된 와전류의 반작용 자계가 2차측 도체판에  $x$ 방향으로  $V_x$ 의 속도로 진행할때 자계분포에 미치는 영향을 검토하기 위하여 식(1)과 식(7)을 이용하여 식(10)을 다시 정리하면 식(11)과 같다. [18]

$$\nabla \times \nabla \times \Psi = -\sigma \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (H_s + \Psi - \text{grad}Q) + \sigma \mu_0 \nabla \times V_x \times (\Psi - \text{grad}Q) \quad (11)$$

본 논문의 입력자계는  $Z$ 축 방향 성분만 존재한다고 가정하였으므로 합성자계  $H_z$ 는 다음 식(12)와 같이 주어지며

$$H_z = H_{sz} + \Psi_z - \frac{\partial Q}{\partial z} \quad (12)$$

식(12)에서  $\frac{\partial Q}{\partial z}$ 항은 전류 벡터 포텐셜  $\Psi$ 의 기준을 정하는 것에 따라 변화하는데 와전류가 흐르고 있는 도체내부에 반작용 자계가 영으로 된다는 조건으로부터 [17] 2차원 직각 좌표계에서의 지배방정식은 식(11)로부터 식(13)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial y^2} = \sigma \mu_0 \left\{ \frac{\partial}{\partial t} (H_{sz} + \Psi_z) + V_x \frac{\partial \Psi_z}{\partial x} \right\} \quad (13)$$

식 (13)를 정식화하여 유한 요소법에 적용하기 위해 해석 영역을 1차 삼각요소로 분할하고 Galerkin 이론을 적용하면 [8] [9]

$$G = \sum_{i=1}^{NT} G_i^e = \sum_{i=1}^{NT} N_i^e \left\{ -\frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial^2 \Psi_z^e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_z^e}{\partial y^2} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial t} (H_{sz}^e + \Psi_z^e) + \mu_0 V_x \frac{\partial \Psi_z^e}{\partial x} \right\} dx dy = 0 \quad (14)$$

여기서  $N_i$ 는 요소의 보간함수이며  $NT$ 는 전 해석 영역의 요소 수로서 본 연구에서는 해석영역인 2차측 알루미늄 도체판에 1차 삼각요소로 요소수 960개, 절점수 527개로 분할하였다.

식 (14)에서 각 요소에 대한  $G_i^e$ 를 수하여 전 요소에 대해 조합한 대수방정식을 풀면 각 절점에서의 전류 벡터 포텐셜  $\Psi$ 가 구해지므로 각 요소에 대한 요소 Matrix는 식 (15)과 같이 얻을 수 있다.

$$G_i^e = \frac{1}{4 \Delta^e \sigma} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 & b_2 b_2 + c_2 c_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 & b_3 b_3 + c_3 c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Psi_1^e \\ \Psi_2^e \\ \Psi_3^e \end{Bmatrix} + j\omega H_{sz} \frac{\mu_0 \Delta^e}{3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} + j\omega \mu_0 \frac{\Delta^e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Psi_1^e \\ \Psi_2^e \\ \Psi_3^e \end{Bmatrix} + \frac{\mu_0 V_x}{6} \begin{bmatrix} b_1 & b_1 & b_1 \\ b_2 & b_2 & b_2 \\ b_3 & b_3 & b_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Psi_1^e \\ \Psi_2^e \\ \Psi_3^e \end{Bmatrix} \quad (15)$$

계수  $b_1, b_2, b_3$  및  $c_1, c_2, c_3$ 는

$$b_1 = y_2 - y_3, \quad b_2 = y_3 - y_1, \quad b_3 = y_1 - y_2, \quad c_1 = x_3 - x_2, \\ c_2 = x_1 - x_3, \quad c_3 = x_2 - x_1 \text{이며 } V_x = (1 - S) V_s \text{ 이다.}$$

식(15)로부터 전류 벡터포텐셜치를 구하기 위한 선행조건으로 2차측에 인가되는 입력자속밀도  $H_{sz}^e$ 는 식(2)로부터 (부록 참조) 그림(1, b)의 권선법에 따라 각권선의 1차전류에 의해서 발생하는  $Z$ 성분의 자속밀도의 합성자속밀도로 그림(2)와 같다.

식(15)로부터 구한 전류 벡터 포텐셜값을 식 (3)으로부터 2차측 알루미늄 도체판위의 각 요소에 해당되는 전류성분을 구하면 식(16), (17)이 된다.

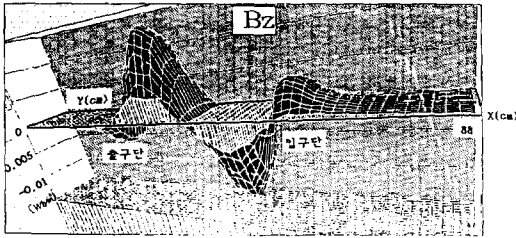


그림 2 1차측전류에 의한 AL도체판에서의 자속 밀도 분포 (wt=45°일때)

Fig. 2 magnetic flux density distribution on the secondary by the primary current (wt=45°)

$$J^e_x = \frac{\partial \Psi^e}{\partial y} = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{2\Delta^e} c_j \psi_j^e \quad (16)$$

$$J^e_y = -\frac{\partial \Psi^e}{\partial x} = -\sum_{j=1}^3 \frac{1}{2\Delta^e} b_j \psi_j^e \quad (17)$$

이로부터 2차측의 알루미늄 도체판의 전체에 작용하는 추력의 평균치는 Lorentz 힘의 방정식에 의해 다음식으로 구해진다.

$$Fx = Re\left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \sum_{x=0}^{X_n} \sum_{y=0}^{Y_n} (J_y \times B_z) \right\} \quad (18)$$

#### 4. 해석결과 및 검토

선형 유도전동기의 설계시나 특성해석을 할 경우에는 반드시 선형 유도전동기가 단부가 존재함으로써 생기는 end-effect 현상이 입력자속의 시간적 변화와 슬립 변화 및 1, 2차측의 상대적 위치에 따라 2차측 알루미늄 도체판위에 유도된 와전류 밀도분포와 추력 특성에 미치는 영향이 검토되어야만 최적 설계 및 운전특성을 파악할 수 있으므로 본 연구에서는 전류벡터포텐셜을 도입된 지배방정식을 유한요소법으로 해석하고 해석의 타당성은 단1차 단2차 선형유도전동기를 구동원으로 한 반송시스템의 실험기에 load cell를 부착하여 측정된 추력의 실험치와 계산치를 비교, 검토하였다.

##### 4.1 시간 변화에 따른 분포

그림 3, 4, 5는 두께 5(mm), 가로 세로의 길이가 88(cm), 24(cm)인 알루미늄 도체판인 해석모델에 전류 벡터포텐셜을 이용한 등포텐셜선으로 곧 2차 도체판에 유도된 와전류 분포 상태를 나타낸 것이다.

그림3는 단1차 편축식 선형 유도전동기의 1차측

을 고정한 상태에서 슬립 S=0.5일때 1차측 입력 전류의 a상을 기준으로 하여 입력 각주파수(wt=0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°)의 시간의 변화에 따른 2차측의 와전류분포 양상이다. 그림 3의 와전류분포 양상을 통하여 기존의 회전형 유도 전동기와 달리 선형 유도기의 구조상 입구단과 출구단이 존재함으로 우수극과 기수극이 발생하는 현상을 확인할 수 있다.

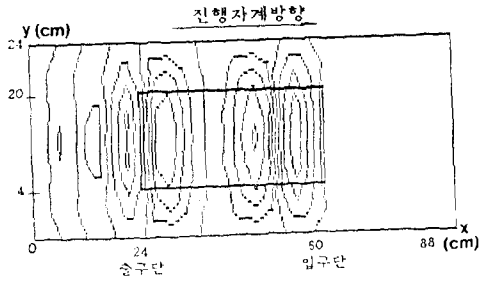
또, 그림 3의 (a)~(f)를 통하여 1차측의 이동 자계에 따라 2차측에 유도된 와전류는 같은 방향으로 진행하며 출구단의 와전류 밀도 분포가 입구단보다 조밀하며 꼬리를 물고 지나가는 현상을 볼 수 있는데 이는 선형 유도전동기 고정자의 1차측 전류와의 사이에 로렌츠의 힘에 의한 흡인력으로 작용하며 공극내의 자속분포에 영향을 미쳐 전체 추력을 감소시키며 특히 선형 유도전동기의 입구단과 출구단에 유도된 와전류 밀도분포의 차이에 의한 힘의 불평형으로 dolphin현상을 야기한다.

##### 4.2 슬립 변화에 따른 분포

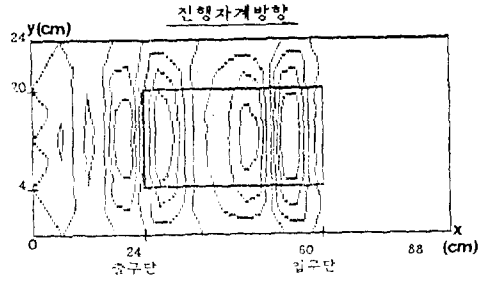
그림 4은 슬립을 1.0, 0.6, 0.2로 변화했을 때 2차측 알루미늄 도체판위에 유도된 와전류 분포 양상으로서 슬립이 감소함에 따라 와전류 밀도분포가 입구단과는 대조적으로 출구단 쪽으로 길게 늘어지는 현상을 볼 수 있는데 이러한 현상은 기존의 회전형 유도전동기와는 달리 단부가 존재함으로써 생기는 end-effect 현상으로 그림 7의 슬립-추력곡선에서 처럼 슬립 S=1에서 최대추력을 발생하며 슬립이 감소함에 따라 추력이 더욱 감소함을 알수 있듯이 슬립 S=1인 그림 4(a) 경우와 슬립 S=0.2인 그림 4(c)을 상대 비교해 보면 출구단에서 유도된 와전류 성분이 많을수록 추력이 더욱 감소하는데 이는 유도된 와전류가 공극내의 자속 밀도분포에 영향을 끼치며 이로 인한 normal force의 증가로 전체 추력을 감소시키는데 이와 같은 end-effect 현상을 최소화하기 위해서 고속도용 선형유도전동기의 설계시에는 극수를 증가시키거나 end-effect경감을 위한 보상권선을 설치하는 방법등이 고려되어야 한다.

##### 4.3 상대 위치에 따른 분포

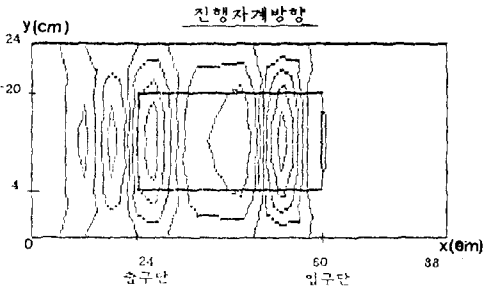
그림 5은 슬립 S=1일때 선형 유도전동기의 1차측과 2차측의 상대위치에 따른 중첩길이가 9, 24, 39, 54, 84, 99(cm)로 증가함에 따라 2차측 알루미늄 도체판 위에 유도된 와전류 분포를 나타낸 것이고 그림 6는 이때 2차측이 1차측에 진입하



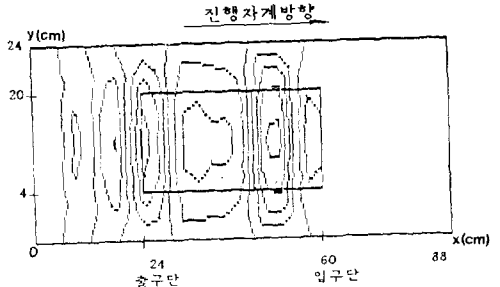
(a)  $wt = 0^\circ$



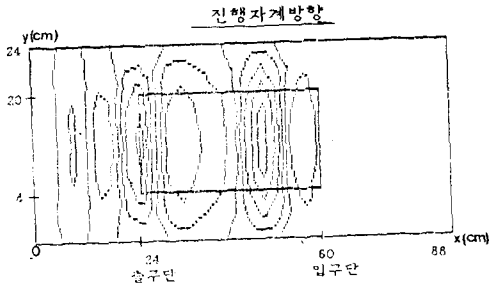
(b)  $wt = 30^\circ$



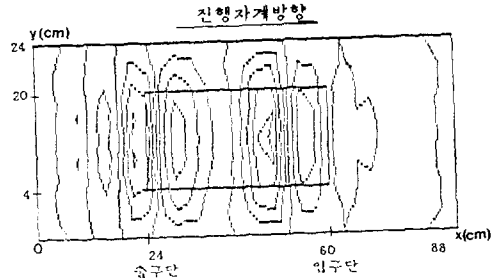
(c)  $wt = 60^\circ$



(d)  $wt = 90^\circ$



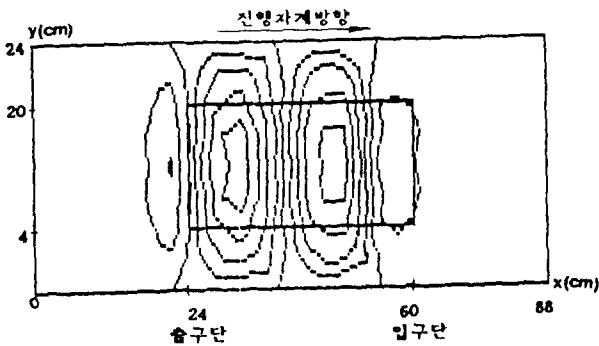
(e)  $wt = 120^\circ$



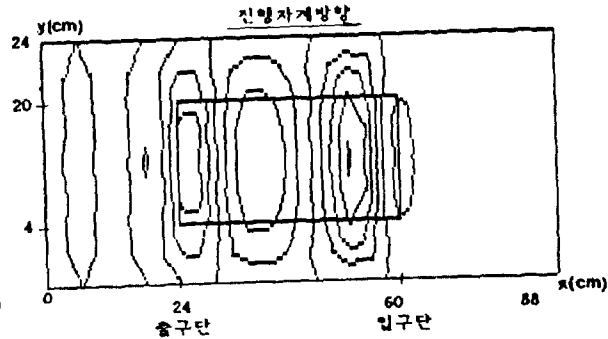
(f)  $wt = 150^\circ$

그림 3 시간변화에 따른 단1차 SLIM의 2차측 와전류분포(슬립  $S=0.5$ )

Fig. 3 Eddy current distribution on the secondary of a short primary SLIM according to the time variation (slip  $S=0.5$ )



(a) slip  $s = 1.0$



(b) slip  $s = 0.6$

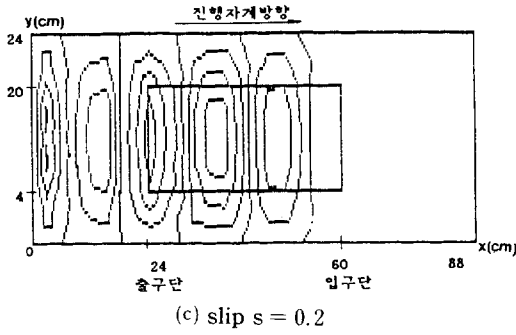


그림 4 슬립변화에 따른 단 1차 SLIM의 2차측 와전류분포 (wt=45°일때)

Fig. 4 Eddy current distribution on the secondary of SLIM according to slip variation (wt=45°)

는 길이에 따른 시동 추력 곡선으로 극극길이 ( $g=2.5\text{mm}$ )를 일정하게 유지하고 1차 입력전류를 20(A), 25(A)일때 유한요소법을 이용하여 얻은 계산치와 실험치를 비교한 그래프로서 2차측의 진입하는 길이가 증가함에 따라 시동추력이 증가하나 0(cm)에서 3(cm)사이, 12(cm)에서 24(cm)사이의 간격에서는 진입길이가 증가하더라도 거의 추력이 증가하지는 않음을 알 수 있는데 이것은 선형 유도전동기의 1차측과 2차측의 상대적 위치에 따른 1차측에서 발생하는 자계가 2차측과 쇄교하여 전부 이동자계를 발생하지 않고 일부는 교번자계를 발생함으로써 중첩길이가 증가하더라도 추력은 직선적으로 증가하지 않음을 알 수 있다. 따라서 선형 유도전동기를 응용한 지상 1차식 반송시스템의 운

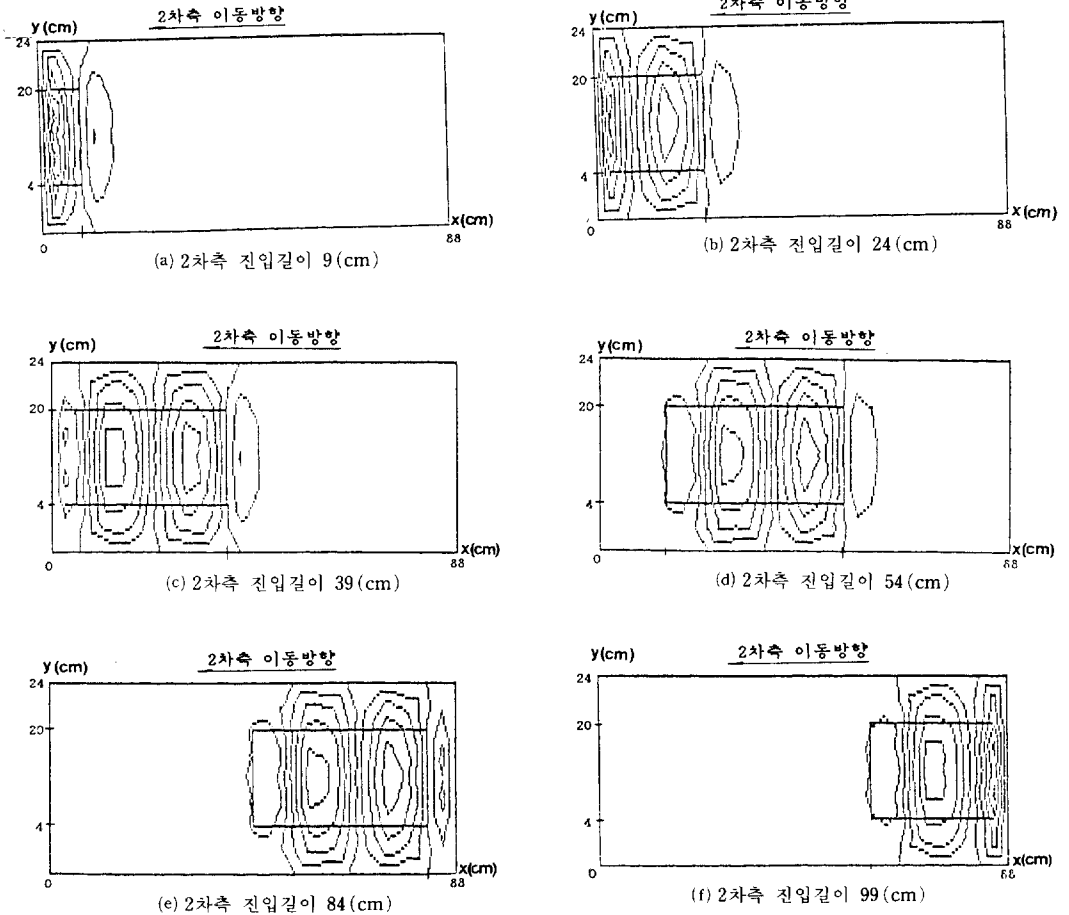


그림 5 단1차 단2차 SLIM의 1, 2차 상대위치에 따른 와전류 분포 (슬립S=1, wt=45°일때)

Fig. 5 Eddy current distribution according to primary-secondary relative position of a short primary-short secondary SLIM (slip=1, wt=45°)

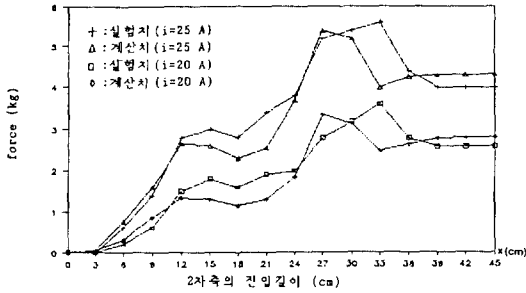


그림 6 시동 추력 곡선(1차축 길이 : 36(cm))  
 Fig. 6 Starting thrust force(primary length : 36 (cm))

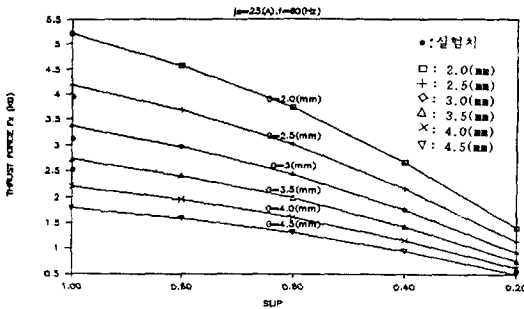


그림 7 공극 및 슬립 변화에 따른 추력 특성 곡선  
 Fig. 7 Thrust characteristic curves according to air gap and slip variation

전시에 선형전동기에 가할 입력의 ON-OFF 제어 방식의 채택시에 스위칭할 지점의 위치 선정시에 이러한 점을 고려하므로 운전효율을 증가할 수 있다.

그림 7은 공극 길이의 변화와 슬립 변화에 따른 추력 특성곡선으로 공극길이를 일정하게 유지하고 슬립을 변화시켰을 때 슬립  $S=1$ 인 기동시에 최대추력이 발생하며 슬립이 감소함에 따라 추력이 요구되는 반송시스템에 응용할 경우나 직선운동이 요구되는 시스템의 속도, 위치제어가 필요한 직선형 servo 기기를 설계할 경우에는 본 연구에 사용한 전동기와 같이 저속도용 전동기로 설계되어야 한다. 또 선형 유도전동기는 공극 길이의 조절이 용이하므로 그림 7과 같이 공극 길이를 변화했을 때 공극 길이를 증가할수록 추력이 감소함을 알수 있는데 추력, 효율을 증가하기 위해서는 구조적으로 허용하는 범위내에서 가능한 감소시켜야 함을 그림 7을 통하여 알수 있다.

### 5. 결 론

본 연구의 해석 결과를 통하여 단1차 단2차 선형 유도전동기의 2차축 알루미늄 도체판위에 시간의 변화, 슬립의 변화 및 1, 2차 상대 위치에 따른 와전류 분포 양상을 제시함으로써 선형 유도전동기가 회전형 유도전동기와 달리 단부가 존재함으로 인하여 2차축에 유도되는 와전류 분포의 end effect 현상을 알 수 있었다.

또한, 상대 위치에 따른 추력과 공극길이의 변화에 따른 추력을 유한요소법에 의해 계산된 결과치를 실험치와 비교, 검토한 결과 거의 유사한 양상을 얻었으며 이로 인해 본 해석방법의 타당성을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제시한 전류벡터 포텐셜을 도입한 유한요소법으로 해석함으로써 기존의 자기벡터포텐셜으로 해석함으로써 와전류가 고려된 자속분포는 알 수 있었으나 2차축에 유도된 와전류의 분포 양상을 볼 수 없었던 것을 가능하게 되었으며, 또 단1차 단2차 선형 유도전동기의 상대위치에 따른 특성을 해석할 경우에 복잡한 경계조건등으로 정확한 해석이 곤란한 것을 가능케 하였다.

앞으로 본 논문은 선형 유도전동기의 설계시나 특성 해석시에 특히 2차축에 유도된 와전류분포의 해석이 가능함으로서 1차축과 2차축의 공간적으로 편위했을 때에 횡방향 편위특성 해석이나 1차축의 권선 방식에 따른 입력자속 분포 특성등을 해석함으로써 transverse edge effect 현상과 최적 권선방식 등의 기본특성 해석이 가능하게 되었으며, 지상 1차방식의 반송장치용 선형 유도전동기의 설계시에 와전류의 분포 양상과 및 속도, 위치제어시에 필요한 시동추력 산정에도 기초 자료로 이용될 수 있으리라 생각된다.

### 참 고 문 헌

- [1] I. Boldea, S.A. Nasar ; "Linear motion electromagnetic systems", 1985.
- [2] Sakae Yamamura, "Theory of Linear Induction motors", John Wiley and Sons, 1979.
- [3] S.A. Nasar, I. Boldea ; "Linear motion electric machines", 1976.
- [4] S. Yamamura H. Ito Y. Ishikawa ; "Theories of the linear induction motor and compensated linear induction motor", IEEE Trans. PAS

pp. 1700-1710, 1971.12.

[5] John K. Dukowicz ; "Analysis of linear induction machines with discrete winding and finite iron length". IEEE trans. vol. PAS-96, no. 1, 1977.2.

[6] C.H. Lee, C.Y. Chin ; "A theoretical analysis of linear induction motors", IEEE Trans. Vol. PAS-98, no. 2, 1979.4.

[7] 小貫, 橋本, 山村 ; "短2次リニア誘導機における端効果 grad  $\phi$  検討", 日本電學論D, 108-11, 昭63.

[8] Kenneth H. Huebner, Earl A. Thornton ; "The finite element method for engineer", John Wiley & Sons, 1982.

[9] 中田, 高義 ; "電氣工學の有限要素法", 森北出版, 1981.

[10] Tako Takahahi, Kentaro kurita ; "computation of eddy currents induced in a conducting sheet under moving magnets", IEEE Trans. on magnetics, vol. 24, no. 1, 1988.2.

[11] Frederic Boullault, Adel Razek ; "Dynamic model for eddy current calculation in saturated electric machines", IEEE Trans., vol. Mag-19, no. 6, pp. 2639-2642, 1983.

[12] A.M. Kamar ; "Solution of nonlinear eddy current problems using residual finite element method for space and time discretization", IEEE Trans. vol. Mag-19, no. 5, pp. 2204-2206, 1983.

[13] Isivan Bardi Oszkar Biro ; "Calculation of the eddy current distribution in the disk of single-phase kilowatt-hour meter by variational method", IEEE Trans, vol. Mag-22, no. 2, pp. 113-117, 1986.

[14] J.L.I. Morris ; "Computational methods in elementary numerical analysis", John Wiler & Sons, 1983.

[15] 임달호, 김민수, 신홍교 ; "전류 벡터 포텐셜을 이용한 와류 분포의 유한요소해석에 관한 연구", 대한 전기학회 논문지, 1988, 12.

[16] Carl T.A. Johnk ; "Engineering electromagnetic field & waves", John Wiley & Sons.

[17] 任達鎬 ; "電氣系の有限要素法", 東明社, 1987.

[18] 岡山, 安藤 ; "短一次形LIMの補償巻線配置と磁界分布の關係の解釋(有限要素法による)", 日本電氣學會研究會資料, RM-84-52, SA-84-23.

부 록(1)

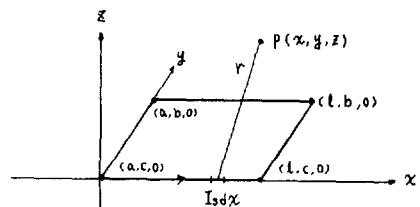
단1차 단2차 변속식 선형유도전동기 사양

	명칭/수치		명칭/수치
1차 축	극간격 : 180(mm) 극수 : 2 도체수 : 25(회) 공극 : 5(mm) 전원주파수 : 60(Hz) 1차축크기 : 36×16×8(cm)	2차 축	동기속도 : 21.6(m/s) 투자율 : $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) 도체판두께 : 5(mm) 2차축크기 : 88×24(cm) Back iron두께 : 5(mm) AL도전율 : $5.5 \times 10^5$ ( $\nu$ /m)

부 록(2)

식 (2)의 Biot-Savart법칙에 의해 아래 그림에서 r만큼 떨어진 점의 자속밀도 B성분은 다음과 같다.

$$B_x = \frac{\mu_0 I_s}{4\pi} \left[ \frac{1}{(x-l)^2 + z^2} \left[ \frac{b-y}{\{(x-l)^2 + (y-b)^2 + z^2\}^{1/2}} - \frac{c-y}{\{(x-l)^2 + (y-c)^2 + z^2\}^{1/2}} \right] - \frac{1}{(x-a)^2 + y^2} \left[ \frac{b-y}{\{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2\}^{1/2}} - \frac{c-y}{\{(x-a)^2 + (y-c)^2 + z^2\}^{1/2}} \right] \right]$$





$$\begin{aligned}
 B_y &= \frac{\mu_0 I_s}{4\pi} \left[ \frac{1}{(y-b)^2 + z^2} \left[ \frac{l-x}{\{(x-l)^2 + (y-b)^2 + z^2\}^{1/2}} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{x-a}{\{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2\}^{1/2}} \right] - \frac{1}{(y-c)^2 + z^2} \right. \\
 &\quad \left. \left[ \frac{l-x}{\{(x-l)^2 + (y-c)^2 + z^2\}^{1/2}} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{a-x}{\{(x-a)^2 + (y-c)^2 + z^2\}^{1/2}} \right] \right] \\
 B_z &= \frac{\mu_0 I_s}{4\pi} \left[ \frac{y-c}{(y-c)^2 + z^2} \left[ \frac{l-x}{\{(x-l)^2 + (y-c)^2 + z^2\}^{1/2}} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{a-x}{\{(x-a)^2 + (y-c)^2 + z^2\}^{1/2}} \right] - \frac{y-b}{(y-b)^2 + z^2} \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\left[ \frac{l-x}{\{(x-l)^2 + (y-b)^2 + z^2\}^{1/2}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{a-x}{\{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2\}^{1/2}} \right] \\
 &+ \frac{x-a}{(x-a)^2 + z^2} \left[ \frac{b-y}{\{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2\}^{1/2}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{c-y}{\{(x-a)^2 + (y-c)^2 + z^2\}^{1/2}} \right] \\
 &- \frac{x-l}{(x-l)^2 + z^2} \left[ \frac{b-y}{\{(x-l)^2 + (y-b)^2 + z^2\}^{1/2}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{c-y}{\{(x-l)^2 + (y-c)^2 + z^2\}^{1/2}} \right] \Big]
 \end{aligned}$$

