論 文
39～8～5

유한 요소법에 의한 편측식 선형 유도 전동기의 1차측과 2차측의 횡방향 편위에 따른 특성해석

The Characteristic Analysis of a Single-Sided Linear Induction Motor due to the Lateral Displacement of the Primary and the Secondary by the F.E.M.

任 達 鎬*·崔 昌 奎**·李 喆 稷**·曺 允 鉉**
(Dal-Ho Im · Chang-Gyo Choi · Cheol-Jick Ree · Yun-Hyun Cho)

요 약

본 연구는 편측식 선형유도전동기의 1차측과 2차측이 공간적으로 편위되었을 때에 추력, 횡방향 수직력 및 와류손을 고찰하기 위하여 2차측에 유도된 와전류와 y-z평면 상의 자속밀도 분포 양상에 대한 특성을 유한 요소법으로 해석하였다,

또한 이에 대한 해석의 타당성을 입증하기 위하여 편위에 따른 시동추력을 실험치와 비교. 검토하였다.

Abstract- For the purpose of investigating the thrust force, the lateral force, and the eddy current loss when the primary and the secondary of a single-sided linear induction motor is displaced in the space, this paper proposes an analysis technique for the characteristics of the eddy current induced on the secondary and the magnetic flux density distribution in the y-z plane by F.E.M. To verify the effectiveness of this analysis technique, the starting-thrust force due to a lateral displacement is compared to the experimental data.

서 론

선형 유도전동기는 회전형 유도전동기를 중심축을 포함한 평면을 잘라 직선상으로 전개한 구조 형태로 되어 있으며 1차측 권선에 흐르는 전류에 의하여 만들어 지는 직선 이동자계와 2차측 알루미늄 도체판에 유도된 와전류 사이에 추력을 발생시키는 동력장치로 현재 저속도에서 고속도에 이르기까지 직선운동이 요구되는 고속전철, FA분야 및 OA분야 등의 적용을 위한 연구가 여러 선진국가에서 활발히 진행중이다.

이러한 응용분야에 적용되는 선형유도전동기 가운데 특히 편측식 선형 유도전동기는 양측식 선형

*正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 敎授·工博
**正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程
接受日字 : 1989年 10月 27日
1次修正 : 1990年 3月 14日
2次修正 : 1990年 5月 14日
3次修正 : 1990年 7月 18日

유도전동기에 비교하여 공간적 변위의 자유도가 크고, 설치시설이 간단하고 용이하다는 구조적 이점을 갖고 있으므로 이에 대한 응용분야 및 특성해석에 관한 연구가 많이 발표되었으나, 해석 시에 주로 1차 여자전류를 면전류(current sheet)로 놓고 변수분리법, 퓨우리에 급수, 퓨우리에 변환 등을 사용하여 해석함으로서 각종 설계정수 및 추력 특성등을 얻을 수 있었으나 선형 유도전동기가 공간적으로 편위되었을 경우의 공간적 편위에 따른 정확한 자속밀도, 특성해석등은 3차원 해석과 복잡한 경제조건으로 인한 해석상의 많은 가정조건등으로 정확한 해를 얻을 수 없었다.[1]·[6]·[9]

또한 수치 해석적인 방법으로 유한 차분법, 유한 요소법, 경계 요소법등을 이용하여 자기벡터포텐셜에 의한 자속밀도 분포특성을 해석함으로서 와전류 성분이 고려된 추력등 여러가지 특성은 알 수 있었으나, 1차측과 2차측의 편위에 따른 2차측의 와전류 분포양상에 의한 제반특성은 알수 없었다.[1~8]

이에 따라, 본 연구에서는 자동 반송장치용으로 적합한 저속도용 편측식 선형 유도전동기를 해석모델로 하여 1차측과 2차측이 공간적으로 편위되어 있을때 2차측의 알루미늄 도체판상에 유도된 와전류 분포를 전류벡터 포텐셜을 도입하여 유한요소법으로 해석하였으며, 이때 2차측에 유도된 와전류성분 중 편위되었을 때 선형전동기의 특성에 중요한 역활을 하는 종방향 성분의 와전류를 입력으로 하여 1차측 적층 방향(x-z평면)의 자속분포양상을 보았으며 또한 공간적 편위에 따른 추력, 횡방향 수직력 및 와류손을 계산하였다.

아울러 본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 실제 자동 반송장치에 사용되고 있는 편측식 선형 유도전동기의 1차측과 2차측이 편위되어 있을 때에 측정한 시동추력과 시뮬레이션 결과치를 비교, 검토하였다.

1. 해석 모델 및 가정

편측식 선형 유도전동기를 구동원으로 한 자동 반송장치를 구성하는 경우 지상 1차방식과 지상 2차방식으로 크게 나눌 수 있으나 본 연구에서의 시작기는 그림 1과 같이 지상 1차방식으로 측면도와 단면도를 나타낸 것이다.

여기서 1차측 고정자 철심은 몸체(Body)에 설치하고 2차측 알루미늄 도체판과 Back iron은 대차(carrier)에 고정하여 레일위에 자유직선 왕복운동이 가능하도록 하였다.

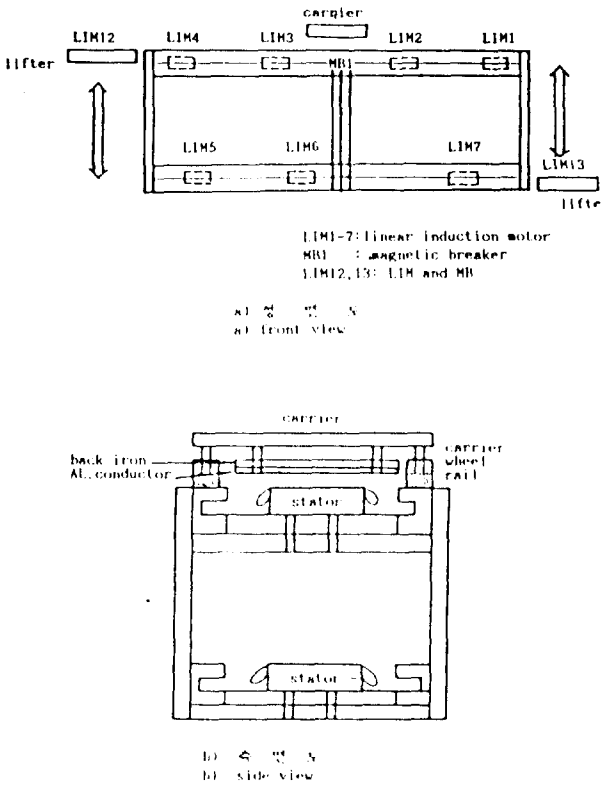


그림 1 자동반송장치의 정면도와 측면도
Fig. 1 Front view and side view of automatic conveyor

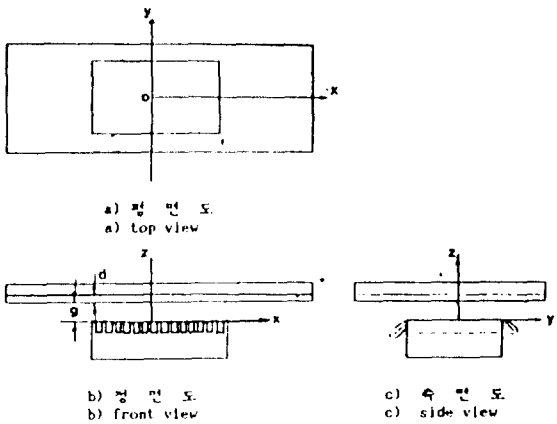


그림 2 해석 모델
Fig. 2 Analysis model

그림 2는 단 1차 편측식 선형 유도전동기의 해

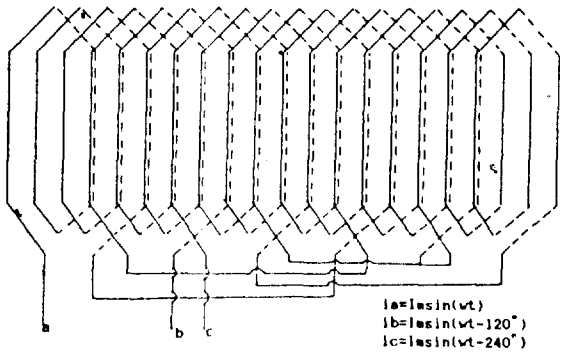


그림 3 권선도
Fig. 3 Winding diagram

석 모델이며 그림 3은 해석 모델의 권선도로서 권선방식은 집중권선으로 1차측의 중앙부에는 2층권선, 양단부에는 1층권으로 상수 $m=3$, 극수 $p=2$, 매극 매상 슬롯수 $q=3$이다.

본 연구에서 2차측 알루미늄 도체판에 유기되는 와전류 밀도 분포및 y-z평면 상의 자속밀도분포를 해석함에 있어서 Maxwell의 전자방정식을 기초로 하여 기본 방정식을 도출하기 위해 다음과 같은 가정을 두었다.

1) 자계는 준정상자계로 변위전류는 무시하며 시간에 대해 정현적으로 변한다.
2) 2차측 알루미늄 도체판의 도전율은 일정하고 표피효과는 무시한다.
3) 2차측에 인가하는 입력자계는 Z축 방향의 성분만 갖으며 공극의 길이는 기계적 공극에 슬롯의 영향을 고려한 Carter계수를 곱한 길이로 취한다. [6]
4) 1차 권선의 주변자속(fringing flux)은 무시한다.
5) 철심에서 자기포화는 무시하고 도전율은 영(zero), 투자율은 등방성이며 매질은 균일하다.

2. 기본 방정식

편측식 선형 유도전동기의 2차측 알루미늄 도체판에 유도된 와전류 분포를 전류 벡터 포텐셜을 도입하여 유한요소법으로 해석하기 위한 기본 방정식은 Maxwell의 전자방정식으로 부터 2차원장의 지배방정식으로 하여 식(1)과 같이 얻을 수 있다. [10]·[11]

$$\frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial y^2}=\sigma\mu_o\left\{\frac{\partial}{\partial t}(H_{sz}+\Psi_z)+V_x\frac{\partial \Psi_z}{\partial x}\right\} \tag{1}$$

여기서 Ψ_z는 전류 벡터 포텐셜의 Z성분

H_{sz}는 1차측 입력전류에 의한 Biot shabart법칙에 의해 구해진 입력자계

V_x는 2차측 대차가 진행하는 속도

σ는 2차측 알루미늄 도체판의 도전율 이다.

식(1)를 정식화하여 유한요소법을 적용하기 위해 전 해석 영역을 1차 삼각요소로 분할하고 Gelerkin이론을 적용하여 임의의 한 요소의 대한 요소 Matrix식은 다음 식(2)와 같다. [7]·[10]·[11]

$$\begin{aligned}G^e_{ixy}=&\frac{1}{4\Delta^e\sigma}\begin{bmatrix} b_1b_1+c_1c_1 & b_1b_2+c_1c_2 & b_1b_3+c_1c_3\\ b_2b_1+c_2c_1 & b_2b_2+c_2c_2 & b_2b_3+c_2c_3\\ b_3b_1+c_3c_1 & b_3b_2+c_3c_2 & b_3b_3+c_3c_3\end{bmatrix}\\ &\begin{Bmatrix}\Psi_1^e\\ \Psi_2^e\\ \Psi_3^e\end{Bmatrix}+jwH_{sz}^e\frac{\mu_o\Delta^e}{3}\begin{Bmatrix}1\\1\\1\end{Bmatrix}\\ &+jw\frac{\mu_o\Delta^e}{12}\begin{bmatrix}2&1&1\\1&2&1\\1&1&2\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\Psi_1^e\\ \Psi_2^e\\ \Psi_3^e\end{Bmatrix}\\ &+\frac{\mu_oV_x}{6}\begin{bmatrix}b_1&b_1&b_1\\ b_2&b_2&b_2\\ b_3&b_3&b_3\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\Psi_1^e\\ \Psi_2^e\\ \Psi_3^e\end{Bmatrix}\end{aligned} \tag{2}$$

단 여기서 Δ^e는 해당요소의 면적이고 b_{ie}, c_{ie}는 $b_{ie}=y_{je}-y_{ke}$, $c_{ie}=x_{ke}-x_{je}$로 x,y는 삼각요소의 절점의 좌표값이며, $_{ie}$, $_{je}$, $_{ke}$의 표시는 순환첨자이다.

식(2)으로 부터 편측식 선형 유도전동기의 1차측과 2차측이 공간적으로 편위되었을 때 각 요소에 대한 전류성분은 식(3), (4)로 부터 얻을 수 있으며 2차측 알루미늄 도체판의 와전류밀도 분포양상을 구할수 있다. [11]

$$Jx^e=\frac{\partial \Psi^e}{\partial y}=\sum_{j=1}^{3}\frac{1}{2\Delta^e}C_j\Psi_j^e \tag{3}$$

$$Jy^e=-\frac{\partial \Psi^e}{\partial x}=-\sum_{j=1}^{3}\frac{1}{2\Delta^e}b_j\Psi_j^e \tag{4}$$

또, 각 편위상태의 와전류성분 중 transverse edge effect로 인한 전동기의 y-z평면상의 자속밀도 분포특성에 미치는 여향을 고찰하기 위해 식(3)를 입력전원으로 하고 자기벡터포텐셜을 미지수로 한

지배방정식은 식(5)와 같이 Maxwell의 전자방정식으로 부터 구할 수 있다.

$$\left(\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 A}{\partial z^2}\right)=-\frac{\partial \Psi}{\partial y}=-J_x \tag{5}$$

식(5)를 유한 요소법으로 해석하기 위해서 y-z평면을 1차 삼각요소로 분할하고 Galerkin이론을 적용하여 해석 영역내의 임의의 한 요소에 대한 요소 Matrix식은 식(6)와 같이 얻을 수 있다.

$$G^e_{iyz}=\frac{\nu^e}{4\Delta^e}\begin{bmatrix} c_1c_1+d_1d_1 & c_1c_2+d_1d_2 & c_1c_3+d_1d_3 \\ c_2c_1+d_2d_2 & c_1c_2+d_2d_2 & c_2c_3+d_2d_3 \\ c_3c_1+d_3d_2 & c_3c_2+d_3d_2 & c_3c_3+d_3d_3 \end{bmatrix}$$
$$\begin{Bmatrix} A^e_1 \\ A^e_2 \\ A^e_3 \end{Bmatrix} -\frac{J^e_x\Delta^e}{3}\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \tag{6}$$

단 여기서 Δ^e는 해당요소의 면적이고 c_{ie}, d_{ie}는 $c_{ie}=z_{je}-z_{ke}$, $d_{ie}=y_{ke}-y_{je}$로 z,y는 삼각요소의 절점의 좌표값이며, $_{ie}$, $_{je}$, $_{ke}$의 표시는 순환점자이다.

이로부터 2차측 알루미늄 도체판의 전체에 작용하는 추력(Fx)과 횡방향 수직력(Fy)의 힘의 평균치는 Lorentz force의 힘의 식으로부터 식(7), (8)을 얻을 수 있다.

$$F_x=R_e\left\{\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T}\sum_{x=0}^{x_n}\sum_{y=0}^{y_n}J_y\times B_z\right\} \tag{7}$$

$$F_y=R_e\left\{\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T}\sum_{x=0}^{x_n}\sum_{y=0}^{y_n}J_x\times B_z\right\} \tag{8}$$

또 2차측 알루미늄 도체판에 손실되는 외류손은 식(9)으로 부터 구해진다.

$$\mathrm{Ped}=\frac{d}{T}\sum_{t=0}^{T}\sum_{x=0}^{x_n}\sum_{y=0}^{y_n}\frac{1}{\sigma}J_e^2\,dx\,dy \tag{9}$$

여기서 T는 주기로 사용주파수에서 1/60(Hz)이며 d는 2차 알루미늄 도체판의 두께이다. 이상의 기본 방정식으로 부터 전류 벡터 포텐셜을 도입한 2차측 와전류밀도분포 및 공간적으로 1차측과 2차측이 철심 적층두께 방향으로 편위되었을 때 y-z평면에서의 자속밀도 분포를 유한 요소법으로 해석하기 위한 계산과정의 흐름도는 그림 4과 같다.

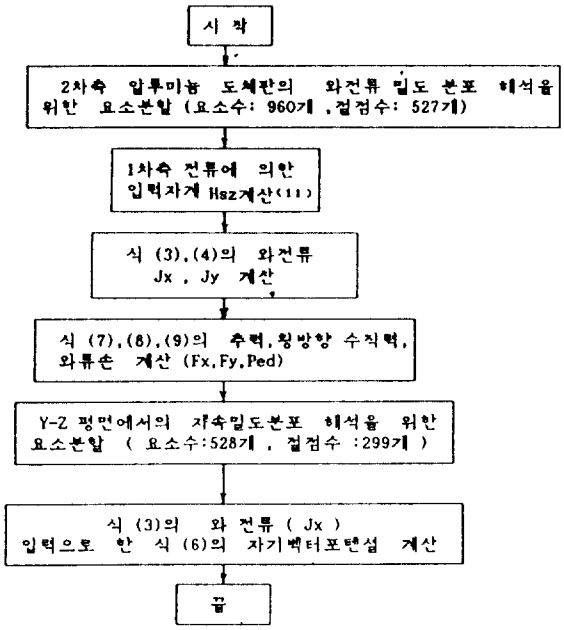


그림 4 계산과정의 흐름도
Fig. 4 Flow chart of computing process

3. 해석 결과 및 검토

2차측을 1차측 고정자에 대해 공간적으로 철심 적층방향으로 dy만큼 편위했을 경우 정전류원 운전시의 2차측 알루미늄 도체판에 유도된 와전류 밀도 분포도와 2차전류중 Transverse Edge Effect에 중요한 영향을 미치는 Longitudinal성분을 입력으로 한 횡방향 자속밀도분포, 그리고 추력, 횡방향 수직력, 와류손에 대하여 논하였으며, 본 해석의 타당성을 입증하기 위해서는 반송장치에 그림 5와 같이 입력 전원을 정전류원으로 구동하고 레일상에 Load cell과 Indicator를 설치하여 정지

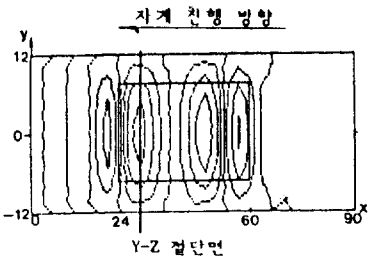
그림 5 실험장치
Fig. 5 Experiment system

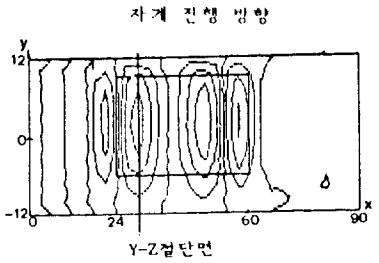
상태에서의 공극 길이와 횡방향 편위에 따른 기동 추력을 측정하였다.

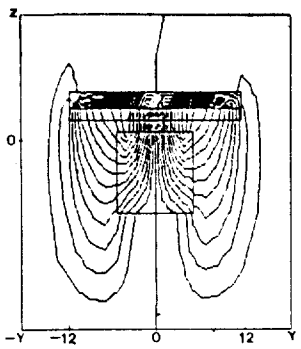
본 해석을 위한 실험기의 중요사양은 부록에 표시하였다.

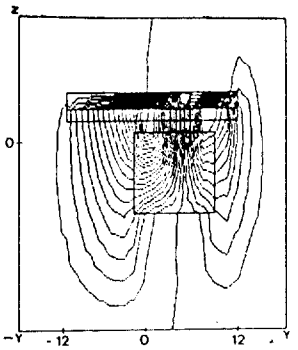
3.1 2차측 와전류 밀도의 횡방향 분포와 와전류 밀도 분포도

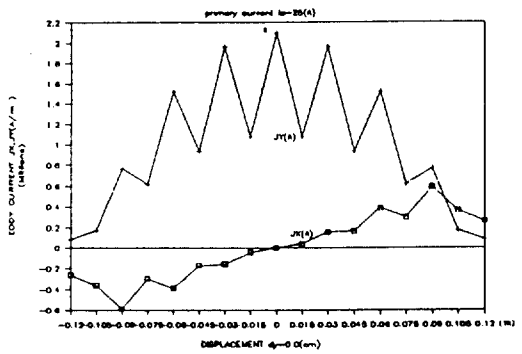
그림 6, 7, 8은 슬립 $S=0.5$, 입력전류의 a상을 기준으로 하여 $wt=0^{\circ}$ 일때 공간적으로 1차측











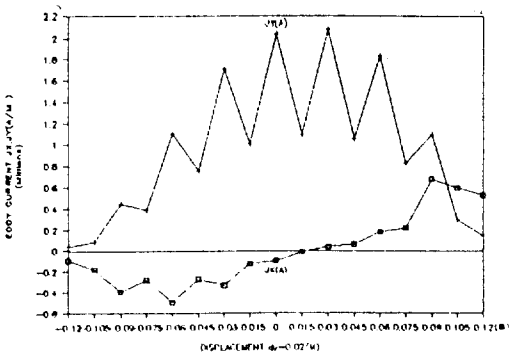


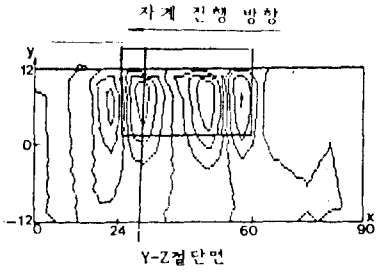
그림 6 횡방향 편위 $dy=0$(cm)일때 ($S=0.5$, $wt=0^{\circ}$, $X=30$(cm)지점)

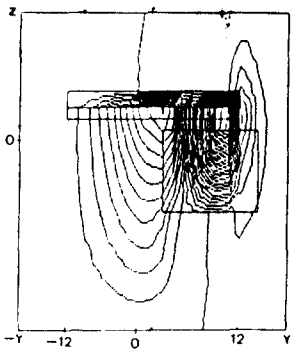
Fig. 6 Lateral displacement $dy=0$(cm) ($S=0.5$, $wt=0^{\circ}$, $X=30$(cm)지점)

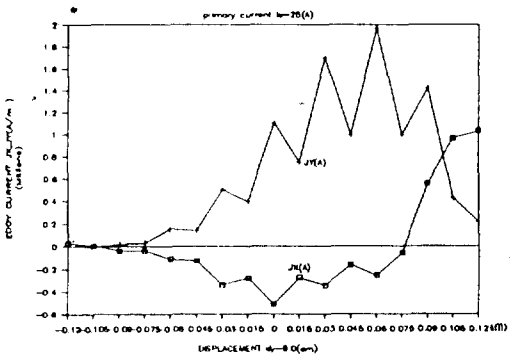
그림 7 횡방향 편위 $dy=2$(cm) 일때 ($S=0.5$, $wt=0^{\circ}$, $X=30$(cm)지점)

Fig. 7 Lateral displacement $dy=2$(cm) ($S=0.5$, $wt=0^{\circ}$, $X=30$(cm)지점)

에 대해 2차측의 횡방향 편위정도에 따라 2차측 알루미늄 도체판에 유도된 와전류 밀도분포와 Y-Z평면상의 자속 밀도 분포를 나타낸 것으로 그림 6-a는 편위 $dy=0$(cm)인 경우의 와전류 밀도 분포이며 그림 6-b는 그때 Y-Z평면상에서 Transverse edge effect에 중요한 영향을 미치는 Longitudinal성분인 와전류 Jx를 입력으로 한 자속밀도 분포를 나타내며 그림 6-c는 2차측의 알루미늄 도체판에 유도된 와전류를 Y-Z평면에서 본 J_x, J_y 값의 분포도이다.







또, 그림 7, 8은 편위정도가 $dy=2$(cm), 8(cm)일 때의 각 상태를 나타낸 것이다. 이상과 같이 1차측과 2차측의 상대적 편위정도가 $dy=0$(cm)일 경우는 알루미늄 도체판의 X-Y평면상의 와전류 밀도분포와 Y-Z평면상의 자속밀도분포는 구조적 중심축에 대칭을 이루나 편위정도가 $dy=2,8$(cm)일때는 1차측의 구조적 대칭축이 이동하는 방향으로 자기적 중심축이 이동하며 편위정도가 클수록 비대칭 현상이 더욱 심화됨을 그림 6-c, 7-c, 8-c를 통하여 알 수 있는데 이것은 결국 힘의 분포도와 와전류손의 불평형으로 시스템의 안정성과 추력을 저하시키므로 선형 유도전동기를 구동원으로 한 자기부상 열차등의 설계시에 횡방향 수직력과 부상장치의 안내력과의 관계, 곡선부분 주행시의 2차측 알루미늄 도체판의 폭길이등을 결정할 경우에 이러한 현상이 반드시 고려되어야 함을 알 수 있다.

3.2 추력, 횡방향 수직력 및 2차측 알루미늄 도체판의 와류손

그림 9는 추력 특성곡선으로서 2차측의 속도가 동기속도(s=0)에 가까워 질수록 또한 1,2차측 사이의 공극길이가 증가할 수록 추력이 감소하는 현상을 알 수 있으며 그림 10은 횡방향 편위에 따른 추력과 횡방향 수직력을 나타낸 것으로 편위(dy) 정도가 커질수록 추력성분은 감소하고 횡방향 수

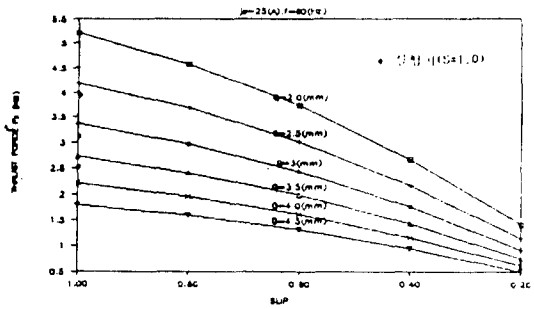


그림 8 횡방향 편위 $dy=8$(cm) 일때 ($S=0.5$, $wt=0°$, $X=30$(cm)지점)
Fig. 8 Lateral displacement $dy=8$(cm) ($S=0.5$, $wt=0°$, $X=30$(cm)지점)

그림 9 공극길이에 따른 추력 특성 곡선
Fig. 9 Thust force curve according to air gap length

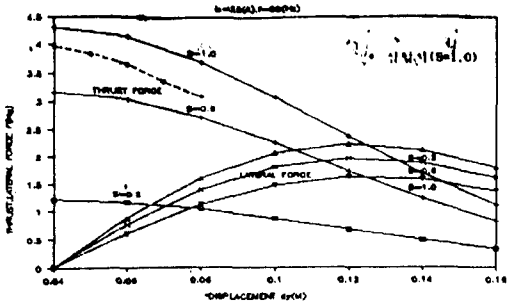


그림 10 횡방향 편위에 따른 추력과 횡방향 수직력 곡선

Fig. 10 Thrust force and lateral force curve according to the lateral displacement

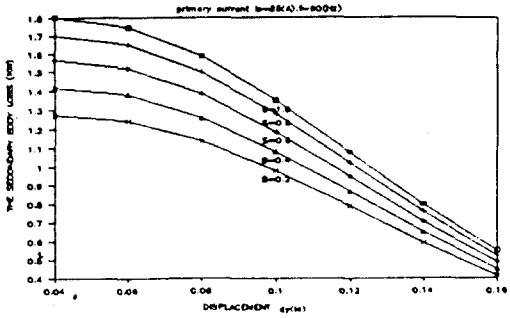


그림 11 2차측 알루미늄 도체판의 와류손

Fig. 11 Eddy current loss of the secondary aluminium conductor

직력 성분은 증가하는 특성을 보여 주고 있는데 이러한 현상을 실험치와 비교, 검토하기 위하여서 그림 5와 같이 반송장치의 시험기에 측정장치를 구성하여 슬립 s=1인 정지상태에서 입력전류를 25(A)로 일정하게 유지시켜 놓고 공극의길이를 변화시켜 측정한 결과치는 그림 9와 같이 시뮬레이션한 계산치와 거의 비슷한 양상을 얻었으며, 또 공극의 길이를 2.5(㎜)로 고정시키고 횡방향의 편위를 증가시켜 추력을 측정한 결과 그림 10과 같이 편위가 클수록 감소하는 현상을 확인할 수 있었다.

그림 11은 슬립속도에 따른 2차측 알루미늄 도체판의 와전류손을 나타낸것으로 동기속도에 가까워 질수록 와류손은 감소하며 또한 편위정도에 따른 와류손은 $dy=6$(cm)인 지점까지는 천천히 감소하다가 그 이후로 급격히 감소하는 현상을 알 수 있는데 이것은 편위로 인한 1,2차측의 중첩율이 감소하기 때문이다.

이상에서 선형유도전동기를 구동원으로 한 응용 시스템에서 공극의 길이를 감소할수록 또 편위정도를 줄일 수록 추력과 전체 효율을 증대시킬수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

저속도용 편측식 선형유도전동기에 있어서 1차측과 2차측의 공간적 편위에 따른 2차측 와전류밀도 분포를 유한요소법으로 해석하고 각 편위에 따른 추력, 횡방향 수직력 및 2차측 알루미늄의 와류손을 구하였다.

해석한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하기 위하여서는 시험기의 1차측을 임의로 편위시킨 상태에서 기동추력을 측정한 결과, 시뮬레이션 결과와 근사한 값을 얻을 수 있었다.

이상의 결과로 볼 때 선형 유도전동기를 응용한 시스템 구성시에 1차측과 2차측에 유도되는 와전류의 전기적 특성의 편위로 인하여 2차측 알루미늄 도체판에 횡방향 수직력(Fy)가 발생하므로 운전시에 선형 유도전동기의 지지, 안내가 불안정하게 되는 원인이 됨을 알 수 있었다.

따라서 본 해석 방법으로 추력, 횡방향 수직력 등을 구할 수 있으므로 선형 유도전동기의 기본 설계시나 고속전철, 반송장치등 응용 시스템설치시에, 특히 고속전철등의 곡선부분 운행구간의 설계시에 1차측에 대한 2차측 알루미늄 도체판의 폭 길이 선정에 있어서 횡방향 편위로 인하여 생기는 현상을 고려하여 구성하므로 운전의 안정성을 높일 수 있을 뿐만 아니라 전체 효율을 증대시킬 수 있다.

참 고 문 헌

[1] T. Koseki and E. Masada, "The charateristics of the single-sided linear induction motors with lateral displacement", IEEJ studying committee on Mag. '86, MAG-86 128, pp. 101~110.

[2] T. Koseki, K. Hayafume and E. Masada, "Lateral motion of a short-startor type magnetic wheel", IEEE, Transaction on Magnetics, Vol, MAG-23, No. 5, September 1987, pp. 2350~2352.

[3] Bolton, h, "Transverse Edge Effect in sheet rotor induction motor", Proc. inst. elect. engrs. 116, May 1969, pp. 725~731.

[4] T.W. Preston, A.B.J. Reece, "Transverse Edge Effect in Linear Induction Motor", Proc. IEEE, Vol. 116, No. 6, June 1969, pp. 973~979.

[5] H. May, H. mosebach, and H. weh, "Numerical Treatment of Transverse Edge effects in linear induction motors", Electric Machines and Electromechanics", June, 1, 1979, pp. 321~330.

[6] S.A. Nasar and I. Boldea, Linear-Motion electric Machies, John Wiley, Interscience, 1975.

[7] Kenneth H. hueb.ıer, The Finite Element Method for engineers, John Wiley anmd sons, 1976.

[8] Sakutaro Nonaka, Tatsuya Furukawa, "Finite Element Analysis of Linear Inuction Motros taking into account Discontinuity of secondary rails", Maglev '89(July), International conference, pp. 339~344.

[9] 梅津, 仲里, 白坂, 野中, "2次導體坂が 橫方向に 偏位した 場合の 兩側式 LIMの 特性" 日本 電學論 B. 60(昭60-8)

[10] 임달호, 전기계의 유한 요소법, 동명사, 1987.

[11] 임달호, 조운현 "단1차 단2차 편측식 선형 유도전동기의 유한요소법에 의한 2차측 와전류 분포해석에 관한 연구", 대한전기학회, 논문지, 1990.5.p.453~481

부록 편측식 선형 유도전동기의 사양

	명칭/수치		명칭/수치
1	극간격 : 18(cm) 극 수 : 2 슬롯수 : 21개	2	AL도체판 두께 : 5(㎜) 길이×폭 : 90×24(cm) Back iron 두께 : 4(㎜)
차	철심폭 : 16(cm) 철심두께 8(cm)	차	도전율 : 5.5×10^{6}(**7**/m) 대차 하중 : 42(kg)
측	슬롯깊이 3(cm) overhang길이 : 5(cm) 슬롯당 도체수 : 50회	측	동기속도 : 28.8(m/s)
기계적 공극 길이 : 2-15(mm) 입력 전류 : 25(A) 주 파 수 : 60(Hz)			