1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999. 7.19-21

2차 도체판 및 back-iron의 접합부가 선형 유도 전동기의 동특성에 미치는 영향

° 우경일[a], 권병일[a], 박승찬[b]
한양대학교 전기공학과[a], 한양대학교 공학기술 연구소[b]

Effects of Joints in the Secondary Conductor and back-iron on Dynamic Characteristics of Linear Induction Motor

° Woo Kyung-Il[a], Kwon Byung-Il[a], Park Seung-Chan[b]
Dept. of Electrical Eng., Graduate School of Hanyang Univ.[a], RIET[b]

Abstract - Linear Induction Motors(LIMs) with the long secondary conductor often have joints between the segmented secondary, which are especially used for magnetically levitated high-speed vehicle and elevators. In this paper, the dynamic characteristics of the LIM with joints in the secondary are investigated using the time-stepping finite element analysis. It is supposed that both aluminium conductor and back-iron have joint in the active zone during the analysis. As a result, thrust and normal force ripple which have effects on the motor dynamics and vibration are examined.

1. 서 론

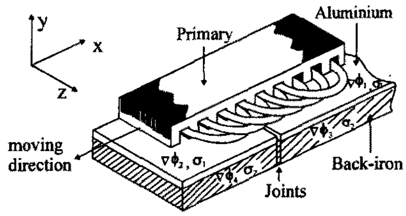
최근 자기 부상 열차, 리니어 엘리베이터 등의 추진 동력원으로 사용되는 선형 유도 전동기는 2차측이 1차측보다 매우 길기 때문에, 2차측의 도체판과 back-iron은 주기적으로 접합되는 구조를 갖는다. 2차 도체판의 접합은 결국 2차 전류의 경로를 차단시켜 추력 및 수직력 특성에 영향을 미치게 된다[1][2]. 또한 back-iron의 접합 역시 자기적 경로를 변경시키므로 전동기의 동특성에 영향을 미치게 된다. 특히, 자기부상 열차나 엘리베이터용 LIM의 경우, 이와 같은 추력 및 수직력의 변화는 부상제어나 진동 특성에 악영향을 미치므로 이에 대한 정량적인 고찰이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 LIM의 1차측이, 접합된 2차측을 통과할 때의 동특성을 시간차분 유한 요소법과 이동 mesh 기법[3]을 이용하여 고찰한다. 접합부의 위치가 active zone내에서 알루미늄 도체판과 back-iron 모두 일치하는 경우와 서로 불일치 하는 2가지의 경우에 관하여 동특성 해석을 한다. 해석의 편의상, 소형의 반송용 LIM을 대상으로 하여 시뮬레이션을 행하였다.

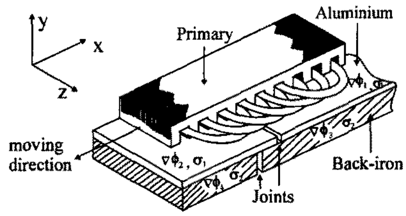
2. 유한 요소 해석

2.1 해석 모델

그림 1은 본 논문에서 해석하고자 하는 선형 유도 전동기로서 1차측의 active zone 내에서 알루미늄 도체판과 back-iron의 접합부의 위치가 동일한 경우와 그렇지 않은 경우를 보여준다. 각각의 접합부의 크기는 1[mm]로 하였고, 알루미늄과 back-iron 접합부의 거리는 31[mm]로 하였다. 본 논문에서는 그림 1의 2가지 모델에 대하여 동특성을 해석하였다. 표 1에는 선형 유도 전동기의 제원을 나타낸다.



(a)접합부의 위치가 동일한 경우(A 모델)



(b)접합부의 위치가 다른 경우(B 모델)
그림 1 해석 모델

표 1 선형 유도 전동기의 제원

1차측	극 수 : 4 철심적층폭: 63 [mm] 슬롯수 : 29 [개] 슬롯 피치 : 11.1 [mm] 극 피치 : 66.6 [mm]
공 극	3 [mm]
2차측	두께 - Al. : 2.0 [mm] Fe : 16.0 [mm]

2.2 지배 방정식

이동좌표계를 사용하였을 경우 그림 1의 해석 모델에 대한 지배방정식을 구하면 식(1)과 같다[4].

$$\frac{\partial}{\partial x}\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial A_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial A_z}{\partial y}\right) = -J_z + \sigma\left(\frac{\partial A_z}{\partial t} + \frac{\partial \phi_1}{\partial z} + \frac{\partial \phi_2}{\partial z} + \frac{\partial \phi_3}{\partial z} + \frac{\partial \phi_4}{\partial z}\right) \quad (1)$$

단, A_z : 자기벡터 포텐셜의 z축 방향 성분,
J_z : 슬롯내의 코일에 흐르는 전류밀도,
σ : 2차측 도체판의 도전율,
μ : 재료의 투자율,
$\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$: 전기 스칼라 포텐셜.

이 지배방정식에 Galerkin 법을 적용하고, 요소 (e)에서의 잔차를 구하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
R_{je} = & \int_S \left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z^{(e)}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z^{(e)}}{\partial y}\right)\right) N_{je}\, dxdy \\
& - \sigma_1 \int_{S_1} \frac{\partial A_z^{(e)}}{\partial t} N_{je}\, dxdy - \sigma_1 \int_{S_1} \frac{\partial \phi_1}{\partial z} N_{je}\, dxdy \\
& - \sigma_1 \int_{S_2} \frac{\partial A_z^{(e)}}{\partial t} N_{je}\, dxdy - \sigma_1 \int_{S_2} \frac{\partial \phi_2}{\partial z} N_{je}\, dxdy \\
& - \sigma_2 \int_{S_3} \frac{\partial A_z^{(e)}}{\partial t} N_{je}\, dxdy - \sigma_2 \int_{S_3} \frac{\partial \phi_3}{\partial z} N_{je}\, dxdy \\
& - \sigma_2 \int_{S_4} \frac{\partial A_z^{(e)}}{\partial t} N_{je}\, dxdy - \sigma_2 \int_{S_4} \frac{\partial \phi_4}{\partial z} N_{je}\, dxdy \\
& + \int_S J_z N_{je}\, dxdy \quad (j=1,2,3) ,
\end{aligned} \tag{2}
$$

여기서, $A_z^{(e)}$는 한 요소내의 자기 벡터 포텐셜이고 N_{je}는 요소의 형상함수이다. 그리고 S_1과 S_2는 접합된 2차 도체판의 단면적이고, S_3과 S_4는 접합된 back-iron의 단면적을 나타낸다.
식 (2)를 전요소에 대하여 적분하여 매트릭스 형식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$
[S \;\; C \;\; Z_1 \;\; Z_2 \;\; Z_3 \;\; Z_4] \begin{bmatrix} A \\ I \\ \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi_3}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi_4}{\partial z} \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = [G]_t , \tag{3}
$$

식 (3)에서 S는 절점의 위치와 투자율 및 와전류 밀도에 관련된 계수 매트릭스, C는 코일의 전류에 관련된 계수 매트릭스를 나타내며, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4는 $\frac{\partial \phi}{\partial z}$에 관련된 계수 매트릭스, G는 전류 밀도에 관련된 계수 매트릭스를 나타낸다.

2.3 전압 방정식의 결합

식 (3)과 같이 자기 벡터 포텐셜과 권선의 전류값 및 $\frac{\partial \phi}{\partial z}$을 미지수로 해를 구하는 경우, 방정식의 수보다 미지수의 수가 많기 때문에 전압 방정식이 필요하게 된다. Krichhoff 전압 법칙을 회로에 적용하면 다음과 같다.

$$
\frac{d\Psi_a}{dt} - \frac{d\Psi_c}{dt} + L\frac{dI_a}{dt} - L\frac{dI_c}{dt} + R_a I_a - R_c I_c = V_a - V_c \tag{4}
$$

$$
\frac{d\Psi_a}{dt} - \frac{d\Psi_b}{dt} + L\frac{dI_a}{dt} - L\frac{dI_b}{dt} + R_a I_a - R_b I_b = V_a - V_b \tag{5}
$$

여기서, Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c는 각 상에 대한 자속 쇄교수, L은 각 상의 코일단의 누설 인덕턴스이다. 선형 유도 전동기가 3상 Y결선이므로 Krichhoff 법칙에 의해 식 (6)이 성립된다.

$$
I_a + I_b + I_c = 0 \tag{6}
$$

식 (4)와 (5)의 시간 미분항 처리를 위하여 후퇴 차분법을 사용하고, 식 (6)과 연립하면 다음과 같이 된다.

$$
[K \;\; X \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0] \begin{bmatrix} A \\ I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = [F]_t \tag{7}
$$

단, K는 역기전력에 관련된 계수 매트릭스, X와 F은 다음과 같으며, Δt는 샘플링 시간이다.

$$
X = \begin{bmatrix} L+\Delta t R_a & 0 & -(L+\Delta t R_c) \\ L+\Delta t R_a & -(L+\Delta t R_b) & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}
$$

$$
F = \begin{bmatrix} \Delta t(V_a - V_c) + \Psi_a^t - \Psi_c^t + L(I_a^t - I_c^t) \\ \Delta t(V_a - V_b) + \Psi_a^t - \Psi_b^t + L(I_a^t - I_b^t) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{9}
$$

2.4 전류의 연속성

접합된 도체판 및 back-iron 부분들에서의 전류의 연속성을 나타내면 다음과 같다.

$$
\int_{S_1} \sigma\left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \phi_1}{\partial z}\right) dxdy = 0, \int_{S_2} \sigma\left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \phi_2}{\partial z}\right) dxdy = 0 \tag{10}
$$

$$
\int_{S_3} \sigma\left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \phi_1}{\partial z}\right) dxdy = 0, \int_{S_4} \sigma\left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial \phi_2}{\partial z}\right) dxdy = 0 \tag{11}
$$

식 (10)과(11)에 후퇴 차분법을 적용하고 정리하면 다음과 같다.

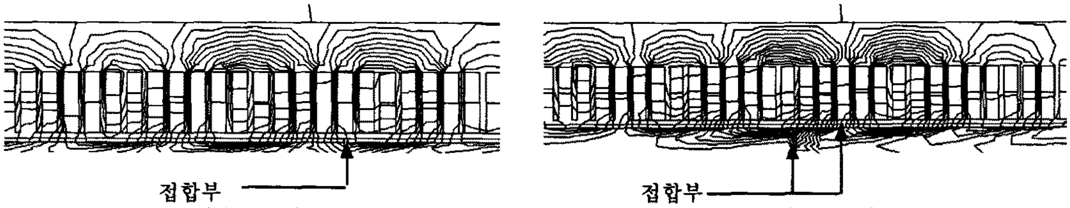
$$
U_1 A_{t+\Delta t} + U_2 A_{t+\Delta t} + U_3 A_{t+\Delta t} + U_4 A_{t+\Delta t} + H_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial z}_{t+\Delta t} + H_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial z}_{t+\Delta t} + H_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial z}_{t+\Delta t} + H_4 \frac{\partial \phi_4}{\partial z}_{t+\Delta t} = M_t \tag{12}
$$

식 (3)과 식 (7) 및 식 (12)를 조합해서 표현하면 다음과 같은 전체 계 매트릭스가 된다. 전체 계 매트릭스의 계수 매트릭스는 $\frac{\partial \phi}{\partial z}$의 도입으로 인하여 비대칭 매트릭스가 되므로 비대칭 매트릭스를 풀 수 있는 BCG법을 이용하여 해를 구한다.

$$
\begin{bmatrix} S & C & Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 \\ K & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ U_1 & 0 & H_1 & 0 & 0 & 0 \\ U_2 & 0 & 0 & H_2 & 0 & 0 \\ U_3 & 0 & 0 & 0 & H_3 & 0 \\ U_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \\ \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi_3}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi_4}{\partial z} \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ U_1 & 0 & 0 & 0 \\ U_2 & 0 & 0 & 0 \\ U_3 & 0 & 0 & 0 \\ U_4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \\ \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi_3}{\partial z} \\ \frac{\partial \phi_4}{\partial z} \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} G \\ F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_t \tag{13}
$$

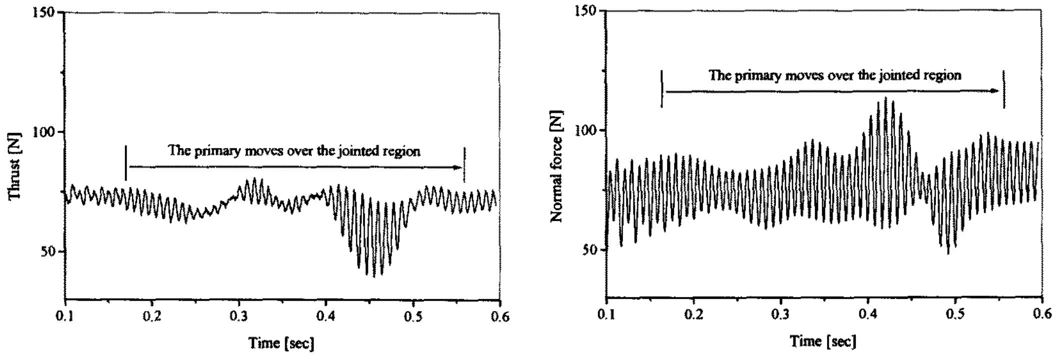
3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 2는 그림 1에서의 A모델(알루미늄 도체판과 back-iron의 접합부의 위치가 동일한 경우)과 B모델(알루미늄과 back-iron의 접합부의 위치가 31[mm] 떨어진 경우)에 대한 자속 분포도를 보여준다. 특히, 2차측에서의 자속 분포도는 접합부의 존재로 인하여 왜형이 일어남을 알 수 있다. 그림 3과 그림 4는 각각 A 모델과 B모델의 추력과 수직력 특성을 나타낸다. A 모델, B모델 모두 1차측이 2차측의 접합부 영역 위를 진입하는 시점에서부터 추력과 수직력의 리플이 증폭됨을 알 수 있다. B모델은 A모델에 비하여 추력과 수직력의 평균치가 각각 20%와 15% 가량 감소하게 되며, 리플의 크기 비교는 표 2에 나타내었다.



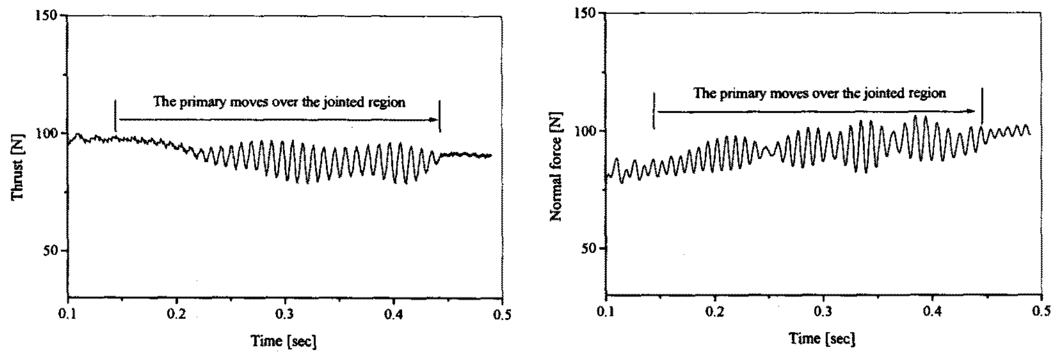
(a)A 모델 (b) B 모델

그림 2 자속 분포도



(a) 추력 (b) 수직력

그림 3 추력 및 수직력 특성(A 모델)



(a) 추력 (b) 수직력

그림 4 추력 및 수직력 특성(B 모델)

표 2 추력 및 수직력 리플의 최대치 비교

	추력 리플	수직력 리플
A 모델	33.58[N]	54.76[N]
B 모델	18.17[N]	22.4[N]

4. 결 론

본 논문에서는 선형 유도전동기 1차측이 2차측 알루미늄 도체판과 back-iron이 접합되어 있는 부분을 이동할 때의 추력과 수직력 특성을 시간차분 유한 요소법과 운동 방정식을 이용하여 해석하였다. 해석 결과, 2차측의 접합부는 와전류 경로의 차단 및 자기적 경로의 변경을 유발시켜 1차측의 이동시에 추력과 수직력의 리플 크기를 변화시키므로, 전동기의 동특성과 전동기가 장착된 시스템의 기계적 진동 특성에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 특히, 2차 도체판과 back-iron의 접합부의 취치가 동일한 경우는 그렇지 않은 경우보다 추력 및 수직력의 리플율이 약 2 배 증가함을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] Sakutaro Nonaka, Tatsuya Furukawa, "Finite Element Analysis of Linear Induction Motors Taking into Account Discontinuity of Secondary Rails", *Maglev'89*, pp. 339-344, July. 1989.
[2] A. Gastli, "Compensation for the effect of joints in the secondary conductors of a linear induction motor", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 13, No. 2, June 1998
[3] Dal-Ho Im, Chang-Eob Kim, "Finite Element Force Calculation of a Linear Induction Motor Taking Account of the Movement", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 30, No. 5, September 1994
[4] 임달호, "전기계의 유한 요소법", 동명사, 1992