

Transverse Edge Effect 를 고려한 선형 유도전동기의 특성 해석에 관한 연구

임 달 호 ( 한 양 대 학 교 ) 김 규 탁 양 성 온

A Characteristics Analysis of L.I.M. considering Transverse Edge Effect

Dal-Ho Lim, Gyu-Tak Kim, Sung-Wn Yang  
( Hanyang Univ )

Abstract

In this paper, A analysis method about air gap field of L.I.M. considering Transverse Edge Effect is suggested. Especially, the case of displacement of primary and secondary it can be analysed and criteria for design of L. I. M. is proposed by proving the influence of ratio of width for primary and secondary to the characteristic

I. 서 론

최근 산업사회의 고도화에 따라 직선운동을 필요로 하는 시스템의 수요가 날로 증가하고 있다. 그러나, 이들 시스템을 구동하는 동력장치는 대부분 회전형 전동기를 이용하고 있는 실정으로 직선운동계에 이를 이용할 경우에는 회전운동을 직선운동으로 변환하는 부수적인 동력변환장치가 필요하므로 시스템 구성이 복잡하게 되며, 이들 변환장치의 의한 손실, 소음, 진동 등이 발생하여 비효율적이다. 이와 같은 단점은 전기 에너지를 직접 직선적인 역학적 에너지로 변환하여 추력을 발생하는 선형 전동기를 이용하면 해결할 수 있다. 그러므로, 선형전동기는 FA, OA 기기를 비롯한 정밀기기 산업, 자동반송장치 및 자기 부상열차 등의 구동원으로서 각광을 받고 있으며 그 수요 또한 날로 증가되고 있다.

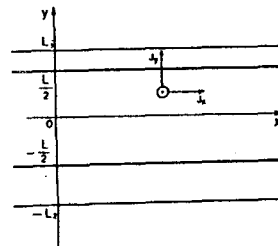
선형 유도전동기는 일반 회전형 유도전동기와 그 구조상 다른 특징 때문에 End Effect와 Transverse Edge Effect라는 특수한 현상들이 나타난다. 특히, 고속운전시 주로 문제시되는 End Effect와는 달리 Transverse Edge Effect는 기동 및 저속에서도 2차 축의 저항을 상승, 유효 공극 길이의 증가, 공극자속분포의 왜곡등 전동기의 제반 특성에 막영향을 미친다. 또한 자기부상 열차 및 자동 반송장치등에서는 이동자가 한쪽으로 편위되어 Lateral force가 발생하여 운전이 불안정하게 되므로 선형 전동기 설계시 반드시 고려하여야 한다.

따라서, 본 논문에서는 Transverse Edge Effect 만의 영향을 고려하기 위하여 End Effect의 영향을 무시할수 있는 저속으로 운전되는 양축식 선형 유도전동기를 모델로 하여 횡방향에 따른 공극자속밀도 분포를 해석하고, 1차, 2차 축의 폭, 극간격등의 비가추력 등 제반특성에 미치는 영향을 규명함으로써 선형 유도전동기의 설계시 필요한 지표 자료를 제시하였다.

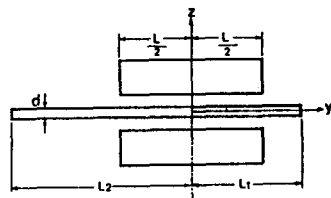
II. 지배 방정식 및 특성 계산

II - 1. 가정 및 지배 방정식

본 논문에서는 그림 (1)과 같은 양축식 선형 유도전동기의 횡방향 특성을 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 두었다.



(a) Upper View



(b) Side View  
그림 (1). 해석 모델

- 1) 1차 여자권선에 의한 전류분포는 Current Sheet 로 고려하며 Slot에 의한 영향은 Carter계수로 고려한다.
- 2) 자계는 준 정상상태이며, 이동방향으로의 변화는 정현적이다.
- 3) 공극자속은 z방향과 평행하며 누설은 무시한다.
- 4) 철심의 부자율은 무한대이다.
- 5) y방향의 편위에 따른 도체판의 도전을 변화는 다음의 등가 도전율로 고려한다.

$$\epsilon_c = \epsilon / K_{rn}$$

$$K_{rn} = 1 - \frac{\tanh(\frac{yL}{z})}{yL/x(1+(\frac{y}{x})\tanh(\frac{yL}{z})\tanh(\frac{K(L-L_1)}{z}))}$$

( $L' = L_1 + L_2$ )

이상과 같은 가정하에서 Maxwell의 전자방정식을 적용하여 공극 자속 분포에 필요한 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} = \frac{\mu_0 d}{g} j_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial x} = -\frac{\mu_0}{g} (dj_y + J_s) \quad (2)$$

$$\frac{\partial j_y}{\partial x} - \frac{\partial j_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial B_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial B_z}{\partial x} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

여기서  $j$ 는 2차측에 유기된 와전류이며  $J_s$ 는 입력 전류이다. 식(3)을  $x$ 에 관하여 편미분하고 식(4)를  $y$ 에 관하여 편미분하여 식(3)에 대입하여 정리하면 2차측 와류중 주력을 발생 하는 성분, 즉  $j_x$ 에 대한 2계 편미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 j_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 j_x}{\partial y^2} = \frac{\mu_0 d}{g} \left[ \omega j_y + V_x \frac{\partial j_x}{\partial x} \right] + \frac{\mu_0}{g} \left[ \omega J_s + V_x \frac{\partial J_s}{\partial x} \right] \quad (5)$$

같은 방법으로 Transverse Edge Effect의 주요 원인이 되는 진행방향의 와류성분, 즉  $j_x$ 에 관한 지배 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 j_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 j_x}{\partial y^2} - \frac{\mu_0 d}{g} (\omega j_x + V_x \frac{\partial j_x}{\partial x}) = 0 \quad (6)$$

식(5)와 (6)은 active 영역에 있어서의 와전류의 분포를 나타내는 지배 방정식이다. 한편 양 overhang 부분에서는 입력전류 및 누설자속이 존재하지 않는다고 가정하였으므로  $j_y$  및  $j_x$ 에 관한 지배방정식을 유도하면 식(7) 및 식(8)로 유도된다.

$$\frac{\partial^2 j_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 j_y}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 j_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 j_x}{\partial y^2} = 0 \quad (8)$$

### II - 2. 경계조건 및 지배방정식의 해

그림(1)의 해석모델에서 알수있는 바와 같이 2차측이 편위되는 경우 양 overhang 영역에서의 와전류 특성이 달라지게 되므로 다음과 같이 영역을 분할하여 해석한다.

- O 영역 :  $|y| < L/2$
- I 영역 :  $L/2 < y < L$
- II영역 :  $-L < y < -L/2$

한편 식(5) 식(8)로 주어지는 지배 방정식의 계변수는 진행방향에 대하여 정현적으로 변화한다고 가정하였으므로 2차측에 유기되는 와전류는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$j_n = J_n(y) \exp(-i \frac{\pi}{\tau} x) \quad (9) \quad (n=x, y)$$

그러므로 1차철심 유효폭내의 지배방정식인 식(5) 및 식(6)은 식(10) 및 식(11)처럼 표현된다.

$$\frac{d^2 J_y}{dy^2} - \left[ \left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2 + \frac{i\omega\mu_0 d}{g} \right] J_y = i\omega \frac{\mu_0}{g} J \quad (10)$$

$$\frac{d^2 J_x}{dy^2} - \left[ \left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2 + \frac{i\omega\mu_0 d}{g} \right] J_x = 0 \quad (11)$$

마찬가지로 양 overhang 에서의 지배방정식은 식(12)와 식(13)으로 표현된다.

$$\frac{d^2 J_y}{dy^2} - \left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2 J_y = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d^2 J_m}{dy^2} = i \frac{\pi}{\tau} J_m \quad (n=1 \text{ 또는 } 2) \quad (13)$$

한편 식(10) 식(13)으로 주어지는 방정식을 풀기 위한 경계 조건으로는 먼저 양 overhang의 끝에서는 진행방향과 수직인  $j_y$  성분이 존재하지 않으므로 다음 조건이 성립한다.

$$J_{y1}(x, L_1) = 0 \quad (14)$$

$$J_{y2}(x, -L_2) = 0 \quad (15)$$

또한 전류연속식  $\text{div } J = 0$  및 전계의 연속조건으로부터 식(16), (17), (18), (19)의 경계조건식이 주어진다.

$$J_{y0}(x, \frac{L}{2}) = J_{y1}(x, \frac{L}{2}) \quad (16)$$

$$J_{y0}(x, -\frac{L}{2}) = J_{y2}(x, -\frac{L}{2}) \quad (17)$$

$$\left( \frac{1}{g} \right) J_{y0}(x, \frac{L}{2}) = \left( \frac{1}{g_1} \right) J_{y1}(x, \frac{L}{2}) \quad (18)$$

$$\left( \frac{1}{g} \right) J_{y0}(x, -\frac{L}{2}) = \left( \frac{1}{g_2} \right) J_{y2}(x, -\frac{L}{2}) \quad (19)$$

그러므로 식(10), (11)과 전류연속식을 경계조건을 고려하여 풀면  $J_{y0}$  및  $J_{x0}$  성분을 식(20)과 (21)처럼 정상항과 과도항으로 나타낼 수 있다.

$$J_{y0} = A \cosh ry + B \sinh ry - \frac{i\omega \mu_0 d}{g} \left[ \left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2 + i\omega \mu_0 d / g \right] \quad (20)$$

$$J_{x0} = -\frac{i\omega}{\left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2} (A \sinh ry + B \cosh ry) = \left[ \left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2 + \frac{i\omega \mu_0 d}{g} \right] \quad (21)$$

같은 방법으로 overhang 부분에서의  $J_{y1}$ ,  $J_{x1}$ ,  $J_{y2}$  및  $J_{x2}$ 를 유도하면 다음과 같다.

$$J_{y1} = C \frac{\sinh k(L_1 - y)}{\sinh k(L_1 - \frac{L}{2})} \quad (22)$$

$$J_{x1} = iC \frac{\cosh k(L_1 - y)}{\sinh k(L_1 - \frac{L}{2})} \quad (23)$$

$$J_{y2} = D \frac{\sinh k(y + L_2)}{\sinh k(L_2 - \frac{L}{2})} \quad (24)$$

$$J_{x2} = -iD \frac{\cosh k(y + L_2)}{\sinh k(L_2 - \frac{L}{2})} \quad (\text{단, } k = \frac{\pi}{\tau}) \quad (25)$$

### II - 3. 추력 및 Lateral Force 계산

선형유도전동기의 발생추력 및 Lateral Force는 로렌츠의 힘의 방정식으로부터 유도할 수 있다. 즉 발생추력은 2차 도체판에 유기된 와류의  $y$  방향성분과 1차 입력전원에 의해 발생된 공극자계  $B_{z0}$ 와의 상호 작용으로 추력이 발생한다. 따라서 추력밀도  $f_x$ 는 식(26)으로 표현할 수 있다.

$$f_x = -\frac{1}{\tau} \text{Re} (J_y \cdot B_{z0}) \quad (26)$$

그러므로 active zone내의 총 발생추력은 식(27)로 주어진다.

$$F_x = -\frac{1}{\tau} \text{Re} \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^{\tau} J_y \cdot B_{z0} dx dy \quad (27)$$

(27)식에서  $B_{z0}$ 는  $x$ 만의 함수이며 (28)식으로 주어지며  $J_y$ 의 평균치를 구해보면 (20)식으로부터 (29)식으로 주어진다.

$$B_{z0} = -i(4J_s/k_g) \exp(-ikx) = -iB_0 \exp(-ikx) \quad (28)$$

$$J_{y(aver)} = A \frac{\sinh(\gamma l/2)}{\gamma l/2} - \frac{iS\omega d}{K^2 + iS\omega d} \quad (\alpha = (\omega d/g)) \quad (29)$$

(27)식에서 (28)식과 (29)식을 대입하여 정리하면 총발생추력  $F_x$ 는 (30)식으로 주어진다.

$$F_x = \frac{1}{2} B_0 I_s L p \tau \operatorname{Re} \left[ \frac{A}{S} \frac{\sinh(\frac{\gamma l}{2})}{\frac{\gamma l}{2}} - i \sin \psi \exp(-i\psi) \right] \quad (30)$$

$$(\tan \psi = S\omega d / K^2)$$

### III. 해석결과 및 검토

본 논문에서 이용한 선형전동기의 정격 및 제원은 표 1과 같다.

표 1. 해석 모델의 정격 및 제원

구분	규격
극간격 ( $\tau$ )	0.091 (m)
극쌍수 (P)	2
Slot 수	21
Slot당 도체수	50
철심폭 (2a)	0.158 (m)
철심두께	0.08 (m)
Slot 폭 (w)	0.009 (m)
Slot 길이 (d)	0.03 (m)
Overhang길이 (l)	0.051 (m)
상수 (m)	3
2차측 표면저항율 ( $\rho$ )	$2.6 \times 10$
2차측 두께 (d)	0.0045 (m)
2차측 폭	0.26 (m)
back iron 두께	0.004 (m)

그림 (2). 좌우대칭인 경우의 y축 방향에 따른 해석결과

그림 (2)는 평방향으로 좌우대칭인 경우의 해석결과이다. (a)는 slip에 따른 자속밀도 분포를 나타낸 것이며 (b)는 slip이 0.2인 경우, (c)는 slip이 1인 경우 자속밀도 및 2차도체판의  $J_y$ ,  $J_x$  를 함께 나타낸 그림이다. 그림 (b) 및 (c)에서 알 수 있는 바와 같이 slip이 증가하면 2차도체판의 와류가 증가하여 결과적으로 공극의 합성자속밀도는 감소하게 된다.

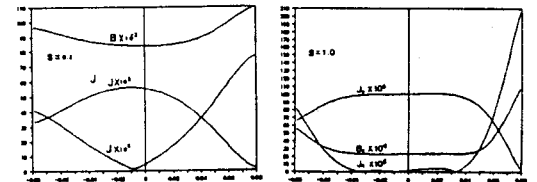
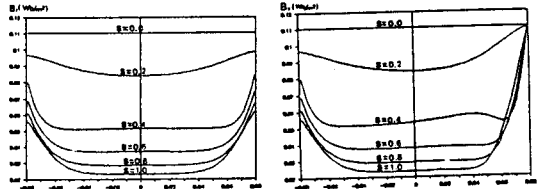


그림 (3). 비대칭인 경우의 y축 방향에 따른 해석결과

그림 (3)은 1차와 2차가 서로 대칭이 아니고 한쪽으로 편위된 경우의 해석결과이다. (a)는 중심에서 2cm편위된 경우이고 (b)는 6cm 편위된 경우의 slip에 따른 자속밀도 분포이다. 여기서 알 수 있듯이 편이가 클수록 자속밀도는 더욱 왜형되며 (c)와 (d)에서 알 수 있듯이 편위가 클수록 왜형이 크게 되는 것은 2차폭이 적은쪽에서는 와류가 더욱 타원형으로 흘러서 공극의 자속밀도를 감소시키는  $J_y$  성분이 적어지기 때문이다. 한편 이부분에서  $J_y$ 는 감소하는 반면  $J_x$ 는 증가하게 되어 공극의 자속밀도도 증가하고  $J_x$ 도 증가하므로 해서 Lateral Force는 편위에 따라 기하급수적으로 증가하게 된다.

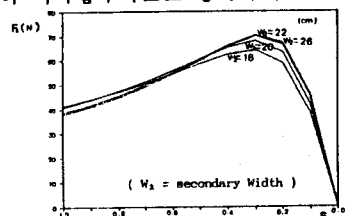
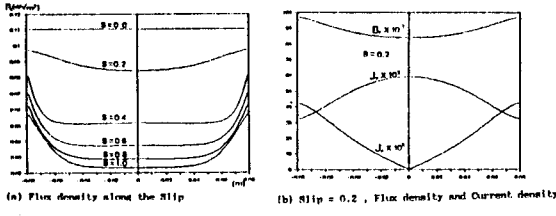


그림 (4) 2차폭변화시 slip에 따른 추력특성

그림 (4)는 1차폭을 고정시켜놓고 2차폭을 변화시켜가면서 slip에 따른 추력을 해석한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 2차폭을 2cm씩 늘려감에 따라 최대 Torque 값은 점점 증가하나 어느정도 이상에서는 거의 증가가 일어나지 않았다. 즉 2차폭이 1차폭의 140%정도 이상에서는 발생추력의 증가가 거의 일어나지 않았으며 따라서 L.I.M의 설계시 2차폭을 1차폭의 1.4배 이상은 할 필요가 없는 것으로 나타났다.

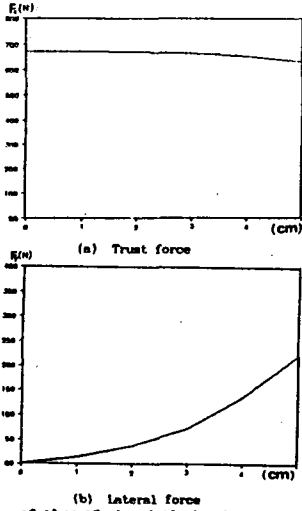


그림 (5). 해석모델의 편위에 따른  $F_x$  및  $F_y$

그림 (5)는 해석 모델의 편위에 따른  $F_x$  및  $F_y$ 의 변화를 해석한 그림이다. 본 해석 모델은 2차축이 1차축에 비해 1.4배를 절인 넘기 때문에 편위에 따른 힘의 변화가 비교적 적었으나 편위가 클수록  $F_x$ 가 감소하고  $F_y$ 는 증가하는 양상을 보여주었다.

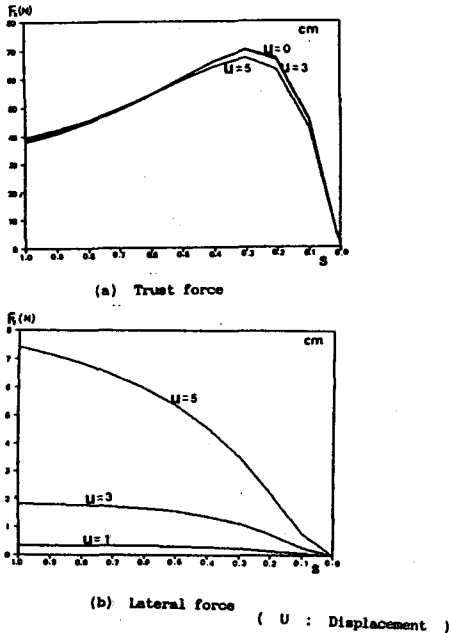


그림 (6). 편위본 모델의 Slip에 따른  $F_x$  및  $F_y$

그림 (6)에서는 1차와 2차가 서로 편위되었을 때 slip에 따른  $F_x$  및  $F_y$ 의 변화를 해석한 그림이다. 편위시  $F_x$ 는 slip에 따라 변화가 적었으나  $F_y$ 는 편위가 큰 경우 slip에 따라 수하특성이 나타났다.

IV. 결 론

본 연구에서는 선형유도 전동기의 횡방향에 따른 공극자계를 정밀하게 해석하기 위한 방법으로 특히 횡방향에 따른 편위시도 적용할 수 있는 해석 방법을 제시하였다. 또한 1차와 2차의 폭의 비율에서 Trans-

verse Edge Effect 를 줄이고 추력 특성을 개선할 수 있는 폭비율을 유도 하였다.

따라서 선형유도 전동기의 설계시 필요한 지표자료를 제시하였으며 본 연구에서 제시한 해석방법을 적용할 경우 운전상태에서 횡방향에 따른 편위시도 오그 특성 해석등의 정밀도를 높일수 있으리라 사료된다.

참고 문헌

- 1) 임달호, 이승현, " 전기기기 ", 보성문화사, 1980
- 2) 박민호, " 유도기기 ", 동명사, 1985
- 3) Bolton, H.(1969) Transverse edge effect in Sheet-rotor induction motor. Proc.Instn.elect. Engrs. 116,725 - 31.
- 4) Sakae Yamamura, " Theory of Linear Induction Motors ", John Wiley and Sons , 1979
- 5) S.A. NASAR ,I.BOLDEA , " Linear Motor Electric Machines ", John Wiley and Sons , 1976
- 6) 장석범, " 직선형 유도전동기의 운전 특성 해석 및 최적설계에 관한 연구 ", 한양대 대학원, 1985
- 7) E.R. Lathwaite, ' Induction Machines For Special Purpose ', London George Newnes Limited, 1966
- 8) S.Yamamura,H.Ito and Y.Ishikawa, " Theory of the Linear Induction Motor and Compensated Linear Induction Motor ", IEEE Trans. PAS , July / August, 1972