

New Type 도시형 자기부상열차용 횡방향 자속 선형유도전동기

조 윤 현, 이 재 봉
한국전기연구소

Transverse Flux Linear Induction Motor for New Type Urban MAGLEV

Yun-Hyun Cho, Jae-Bong Lee
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

This paper proposes the linear induction motor with salient poles, transverse flux and the secondary aluminum conductor for a new type urban MAGLEV.

Compared with the more usual kind of linear induction motor with longitudinal flux, TFLIM have flux paths lying transversely to the direction of motion. This shortens the magnetic circuit and produces the thrust, the attraction force and the lateral stabilization force simultaneously. Owing to these electrodynamic force, TFLIM will be usable to a new type urban MGLEV.

1. 서 론

최근에 선형전동기를 추진장치로 한 자기부상열차와 직선형 이송물 장치에의 동력원으로 응용이 활발히 연구되고 있다.

자기부상열차의 동력원으로 사용하는 기존의 종방향 자속 선형 유도전동기는 운전중에 수직력이 발생하여 차량의 무게를 증가케 함과 동시에 시스템의 외란으로 작용함으로써 수직력을 최소로 작용하도록 설계, 운전되고 있으며 전동기의 에너지 변환 효율이 낮다. [1]-[3]

따라서 본 연구에서는 기존의 상전도 흡인식 부상방식의 자기부상열차 전자기시스템에서 부상용 전자석과 추진용 선형 유도전동기 대응으로 기존의 종방향 자속 선형 유도전동기와는 달리 횡방향 자속형을 이용케 함으로서 이동차에서 발생하는 추력은 자기부상열차에서 추진력으로 작용하며, 발생하는 흡인력은 차량의 무게를 감소케 하면서 차량의 좌우운동에 대해 안내력을 동시에 얻을 수 있는 횡방향 자속 선형유도전동기에 대하여 논하였다.

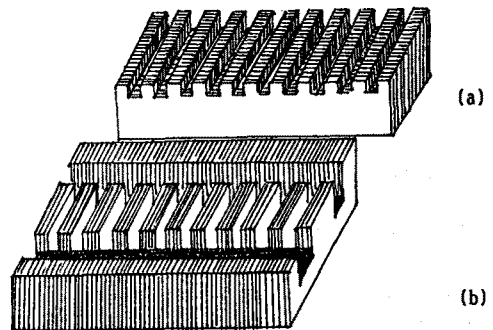
또한, 횡방향 자속형 선형유도전동기에서는 종방향 자속형 선형 유도전동기와는 달리 수직력을 부상력으로 이용함과 동시에 안내력과 추진력을 발생되므로 전동기로서 효율을 극대화 할수 있는 구조의 New type 도시형 자기부상열차의 전자기 시스템을 제안하였다.

2. TFLIM의 해석모델 및 특성시

선형유도전동기는 그림 1과 같이 기존의 회전형 유도전동기를 중심축으로 잘라 펼쳐놓은 구조로서 1차측 슬롯내에 흐르는 전류에 의해 이동자계를 형성하고, 2차측의 도차관에 유도되는 와전류와의 프레임의 원손벌칙에 의해 직선방향의 추진력을 얻을 수 있는 전자기 에너지 변환장치이다.

일반적인 선형유도전동기는 이동자계를 발생케 하는 자속의 자기적 폐회로의 구성은 이동자계의 방향과 같은 방향으로 형성하기 위하여 1차측의 철심의 적층방향은 그림 1(a)와 같은 구조로 종방향 자속 선형유도전동기이다.

그러나 본 연구에서 제시한 선형유도전동기는 그림 1(b)와 같이 이동자계 방향에 수직방향으로 자기적 폐회로를 구성하기 위하여 1차측 철심의 적층방향이 이동자계와 동일 방향으로 적층하는 횡방향 자속 선형유도전동기로서 이에 대한 특성고찰과 자기부상열차의 전자기시스템으로서 적용가능성을 설명한다.



(a) 종방향 자속 선형유도전동기(Longitudinal Flux LIM)
(b) 횡방향 자속 선형유도전동기(Transverse Flux LIM)

그림 1. 선형 유도전동기

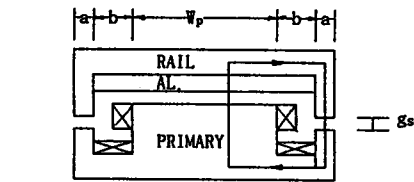
Fig. 1. Linear Induction Motor

2.1 TFLIM의 해석 모델

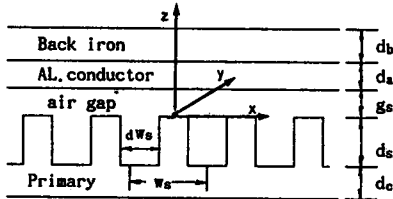
횡방향 자속 선형유도전동기는 그림 2과 같이 1차측 철심은 E자형 구조로 1차측에 입력전류를 흘릴수 있는 1차 권선과 1차 권선에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자속이 차량의 진행 방향에 대해 횡측 방향으로 자속이 잘 통하게 규소강판을 차량 추진방향으로 적층시킨 형태로서 되어 있다. 또한, 2차측은 U자형의 중앙부분에 Back iron과 Al.도체판으로 되어 있으며, 양쪽 돌극부분은 자성체로 자료가 중앙부분에서 양쪽을 통하여 자기적 폐회로를 잘 구성하게끔 되어 있다.

이와 같은 TFLIM에 대한 공극내의 자속분포 특성을 고찰하기 위해 해석모델에 대하여 다음과 같은 가정을 두었다.

1. 철심부분의 투자율은 무한대이며 도전율은 영이다.
2. 1차측의 길이는 X축 방향으로 무한장이며, 슬롯은 공간적으로 주기성을 갖는다.



a) 측면도 (End view)



b) 정면도 (Front view)

그림 2. TFLIM의 해석 모델
Fig. 2. Analysis Model of TFLIM

2.2 특성식

그림 2의 TFLIM 해석모델에서 가정 1), 2) 하에 1차측의 X, Y 축방향으로 공극자속밀도의 수직성분인 $B_z(x, y)$ 는 식 (1)과 같이 표현할수 있다. [4]

$$B_z(x, y) = B_{g0}(x) \cosh(2a - \frac{y}{W_p}), 0 \leq y \leq 0.5W_p$$

$$B_z(x, y) = B_{g0}(x) (\frac{2}{\tau - W_p})^2 (0.5\tau - x)^2 \cosh(a), 0.5W_p \leq y \leq \tau - 0.5W_p$$

$$B_z(x, y) = -B_{g0}(x) \cosh(2a - \frac{\tau - y}{W_p}), \tau - 0.5W_p \leq y \leq \tau$$

여기서 $B_{g0}(x)$ 는 그림 2(a)의 측면도에서 Amperer의 주회법칙을 적용하면 식 (2)와 같이 얻을 수 있으며,

$$B_{g0}(x) = \mu_0 \frac{MMF(x, t)}{g(x)} = \mu_0 MMF(x, t) P(x) \quad (2)$$

x축상의 어느 한지점에서 공극자속밀도의 기본파 성분은 그림 2(a)에 기자력분포를 fourier해석으로 구하면 식 (3)과 같이 구할수 있다.

$$B_{g0} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sqrt{2} \mu_0 k_w MMF(t)}{(2g_s + d + (1.5a + b)a/\mu_{di})} \quad (3)$$

x축상에서 공극자속은 1차측의 슬롯과 치부분에 의해 공극 길이가 변화함으로 식(3)에서 공극길이 g_s 는 x의 함수로 fourier급수로 식(4)와 같이 전개하여 표현할수 있으며,

$$g(x_s) = (g_s + d_s) \left(1 + \frac{d_s}{(g_s + d_s)} g_{su}(x_s) \right) \quad (4)$$

여기서 $g_{su}(x)$ 는

$$g_{su}(x_s) = \frac{d_w s}{w_s} + \frac{2}{\pi} \sum_{N=1}^{\infty} \frac{1}{N} \sin N\pi \frac{d_w s}{w_s} \cos Nn_s x_s$$

또한, 식 (2)의 permance값으로 표현하면 $p(x)$ 는 식 (5)로 나타낼수 있으며, 식 (5)를 식(2)에 대입하면 2차원 x-y평면에서의 정지상태에서의 공극자속밀도를 구할수 있다.

$$p_s(x_s) = \frac{1}{(g_s + d_s)} \left[1 - \frac{(d_s/g_s)}{(1 + d_s/g_s)} g_{su}(x_s) \right] \quad (5)$$

그림 2에서 입력전류를 DC와 AC전류를 인가할 경우는 식(2)의 기자력분포를 식(6)의 기본파 성분의 면전류 밀도로 환산할수 있다.

$$J(x) = J_0 + J_1 \sin(x/\pi + \delta) \quad (6)$$

여기서 δ 는 위상각이며, J_1 는 AC기자력의 기본파 전류밀도, J_0 는 DC전류성분이다.

이상에서 TFLIM에서 발생하는 추력과 수직력은 식 (7)의 공극내 자기에너지 W의 x, y변화방으로 (8)에서 구할수 있다.

$$W_m = 0.5\mu_0 (W_p + 2b) \int H(x)^2 / g(x) dx \quad (7)$$

$$F_x = \left[\frac{\partial W}{\partial x} \right]_{J_1} \quad F_y = \left[\frac{\partial W}{\partial y} \right]_{J_1} \quad (8)$$

3. TFLIM의 시작기 및 자속분포특성

본 연구에서는 TFLIM의 동작특성과 자기부상열차의 전자기 시스템으로서의 적용 가능성을 고찰하기 위하여 1991년 한국 전기연구소에서 개발한 KOGMAG-01의 추진용 선형유도전동기와 유사한 크기의 시작품을 사진 1과 같이 시작품을 개발하였다. 이에 대한 사양으로는 1차측의 길이가 470(mm), 폭 360(mm), 높이 146(mm)인 3상 4극기로서 정격전압 220(V), 정격전류 24(A)에 300(N)의 추력이 발생토록 설계, 제작하였다.

또한, 부상력을 증대하기 위하여서는 1차측 철심의 E자형 중심요철부를 중심으로 LIM권선하부에 DC 여자코일을 알루미늄 권선 권선수 200회, 정격전류 40(A)에 6000(N)의 부상력을 발생하도록 설계, 제작하였다.

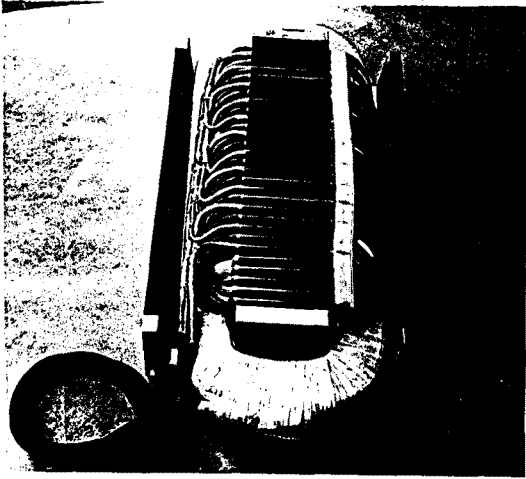


사진 1. 횡방향 자속 선형유도전동기
Photo 1. Transverse flux LIM

이에 대한 시작기의 자속 분포 특성은 2차원 유한요소법과 본 연구에서 제시한 해석적인 방법으로 특성을 분석, 비교하였다. 그림 3은 FLUX2D의 유한요소 해석프로그램으로 해석한 자속분포 특성으로서 그림 2(a)와 같이 TFLIM의 측면에서 본 순시 자속분포도이다. 그림 4는 마찬가지로 유한요소법으로 해석한 결과로 그림 3의 A-B선의 연결선상에서의 자속분포 특성곡선을 나타낸다.

이상에서 알수 있다시피 LIM의 1차측 권선에서 발생하는 이동자계가 차량 진행방향에 대해 수직인 횡방향 자속으로 폐회로가 형성됨을 볼수 있다.

따라서 LIM권선에서 발생하는 자속이 2차측 레일을 통하여 돌출극으로 양분하여 2개의 폐회로를 순간적으로 형성하면서 이동자계를 형성함으로써 추진력과 흡인력이 동시에 발생함을 정성적으로 고찰할수 있었다.

또한, 돌출극의 자속밀도는 단면적에 반비례하며 기존 중방향 자속 선형유도전동기보다 자료가 짧으므로 전자기적 에너지 변환효율을 향상할수 있음을 알수 있었다.

그림 5는 이론적 해로 구한 공극내의 자속 밀도 분포곡선으로서 그림 4와 유사한 곡선을 형성함을 알수 있으며, 특히 공극자속밀도가 양쪽의 돌출극부분에서의 자속밀도 크기가 중앙부분에 비하여 6배정도 큰 값으로 빨리 포화치에 가까워짐을 알수 있다. 이는 설계시에 돌출부와 중앙부분의 폭비가 중요한 설계변수로 최적적으로 결정되어야 함을 알수 있다.

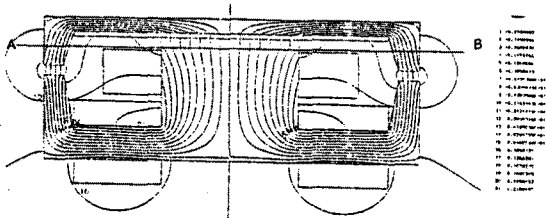


그림 3. TFLIM의 자속밀도 분포도 (Y-Z 평면)
Fig.3. Flux density distribution of TFLIM (Y-Z Plane)

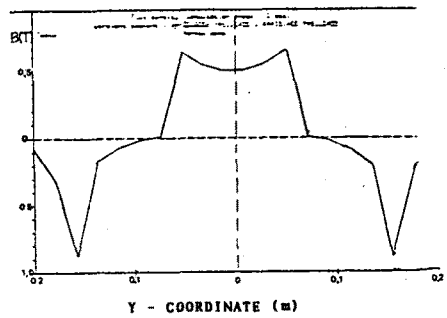


그림 4. TFLIM의 자속밀도곡선 (A-B선)
Fig.4. Flux density curve of TFLIM (A-B line)

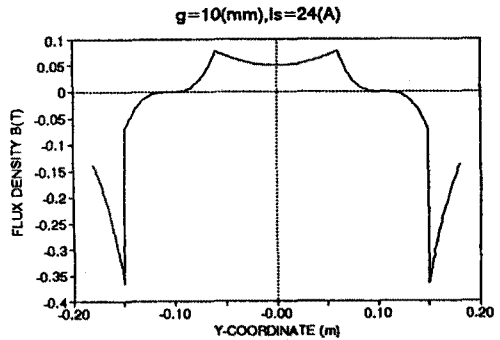


그림 5. TFLIM의 자속밀도 곡선 (공극)
Fig.5. Flux density curve of TFLIM (Air gap)

4. TFLIM을 구동원으로 한 자기부상열차

그림 1(a)와 같이 중방향 자속 선형유도전동기를 추진장치로 하고, 부상용 전자석에서 발생하는 흡인력으로 차량을 레일로부터 일정한 공극을 유지하면서 달리는 상전도 흡인식 자기부상열차는 추진시에 선형유도전동기가 발생하는 흡인력은 차량의 무게를 증가케함으로써 차량전체의 효율을 저하시키고 외란으로 작용하여 시스템을 불안정하게 한다.

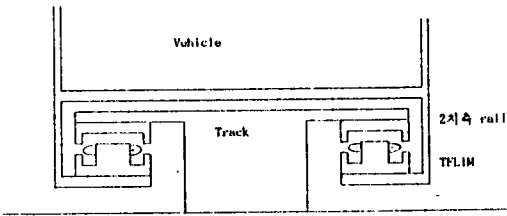
따라서 이와 같은 현상을 최소화하기 위하여 선형유도전동의 동작영역에서의 흡인력을 최소화하는 제어시스템의 구성과 최적설계에 대한 연구가 필수적이다.

본 연구에서는 이러한 결점을 보완할수 있으며 전체 시스템을 compact화 할수 있는 새로운 방식의 도시형 자기부상열차의 전자기 시스템을 그림 6과 같이 제안하였다.

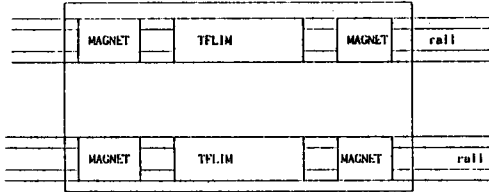
그림 6은 횡방향 자속 선형유도전동기에서 발생하는 3분력(추력, 흡인력 및 안내력)을 상시 차량의 추진과 부상, 안내력으로 이용하고 부하 및 속도변화에 따른 영향등은 제어용 전자석으로 차량을 제어케 하는 구조이다.

그림 6(a)의 측면도와 같이 횡자속 선형유도 전동기는 트레하부의 양쪽 측면에 일정한 공극을 두고 차량 양쪽 하부에 장착하며, 횡자속 선형유도전동기의 양측에는 그림 6(c)의 정면도와 같이 차량 부상의 제어용으로 U자형 전자석을 배치하는 구조이다.

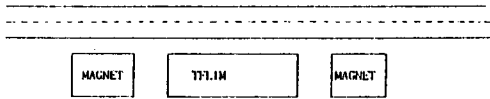
따라서 차량의 추진은 횡자속 선형유도전동기로 추진하면서 여기에서 발생하는 수직력이 차량 부상용으로 이용하고 부족한 수직력은 전자석이 담당케 함으로서 에너지 효율적인 측면과 시스템의 compact 및 안정성을 도모코자 하였다.



a) 측면도
a) End view



b) 평면도
b) Top view



c) 정면도
c) Front view

그림 6. TFLIM을 이용한 New type 도시형 자기부상열차의 전자기시스템 구성도

Fig.6. Electricmagnetic system configuration for New type Urban MAGLEV with TFLIM

5. 결론

본 연구에서는 횡방향 자속 선형유도전동기를 이용한 새로운 방식의 도시형 자기부상열차의 전자기 시스템을 제안하였다. 이에 대한 실용가능성과 기존의 종축형 선형유도전동기와의 특성을 정량적으로 검토하기 위하여 1991년 한국전기연구소에서 개발한 유사한 크기의 시작기로 1차속 길이 470(mm), 폭 360(mm)의 소형 TFLIM을 설계, 제작하였다.

또한, 특성분석을 하기 위하여 공극내의 자속분포 특성등을 유한요소법과 이론적 방법으로 비교하였다.

그러나 본 연구에서 제시한 도시형 자기부상열차의 실모델 개발을 위해서는 TFLIM과 LFLIM과의 보다 정량적인 비교와 차당전계 시스템의 상호작용 및 새로운 제어 알고리즘이 선택되어야 함으로 앞으로 충분한 검토가 이루어져야 할것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] S.A.Nasar, I. Boldea, "Linear Electric Motor: Theory, Design and Practical Applications", Prentice-Hall
- [2] E.R.Laithwaite, J.F.Eastham, H.R.Bolton, "Linear motors with transverse flux", Proc. IEE, Vo.1.118, No.12, Dec. 1971, pp.1761-1767

- [3] S.Nonaka, N.fujii, Y.Kojima, "Characteristics and Speed Control of Linear Induction Motor for urban transit", JEEE 88-188, pp.71-80, 1988
- [4] Yun-Hyun Cho, Pan-Seok Shin, "A 2-D Finite Element Analysis of single-sided LIM by using Current and Magnetic Vector potential", ISEM, Sendai Conference, pp.187, 1992. Feb.