

자기 부상 및 추진 결합 TFLIM의 해석

張 錫 明 (忠南大 工大, 電氣工學科)

The Analysis of a TFLIM for Electro-magnetic Levitation and Propulsion

Seok-Myeong Jang (Chung-nam National Univ.)

Abstract

In transverse flux linear induction motors(TFLIM), The loops of the working flux lie in planes transverse to the direction of motion. With a poly-phase primary winding, The TFLIMs has both electro-magnetic propulsion and levitation force. Thus, TFLIMs will be useful in high speed ground transportation systems.

In this paper, The characteristics of a single sided TFLIM are analysed by using electromagnetic field theory.

1. 서론

回電型 전동기에 의하여 바퀴와 레일로 구성되는 시스템(wheel on rail system)은 300[km/h] 이하의 超高速 電鐵과 같은 驅動시스템에서 응용, 개발되어 왔다. 그러나 초고속 전철은 물론 항공기 移轉 장치용 300[km/h] 에서부터 550[km/h] 정도까지의 超高速(super speed)영역범위에서는 바퀴와 레일의 역학적 특성등에 의하여, 바퀴가 없이도 구동, 추진 할 수 있는 시스템(wheel-less propulsion system)이 되어야 하며 이 경우 구동장치로는 直線型 전동기(Linear motor)가 가장 효과적일 것으로 판단되고 있다. 즉 트랙과 차체에 직선형 전동기의 1차와 2차속을 각각 설치하여 推進力을 발생시키며 더 나아가 자기적으로 浮上시키는 MAGLEV 시스템(Magnetically levitated system)을 개발하여 초고속 구동을 하게된다. 육상운송카지도 超高速로 초고속화 하는 수세를 볼때 이의 계속적인 연구의 필요성은 당연하다고 하겠다.

더구나 앞으로 超電導 기술이 발달하는 경우, 대전류에 의한 초강력 자계의 발생등이 가능하게 되므로 자기부상방식의 실현은 그 願望이 더욱 밝으며 그 경우 추진력 발생장치인 직선형 전동기로는 直線型 誘導電動機(L.I.M), 直線型 同期電動機(L.S.M), 直線型 誘력전스 電動機(L.R.M)등이

효과적이다. 그런데 이들은 주로 권속식으로 하여 응용되며, 자기부상 방식으로는 흡인형과 반발형으로 크게 나누어 개발되고 있다. 추진력 발생장치는 각기 별도의 자기부상장치를 수반하므로 부상 방식, 전력공급, 트랙설비등 여러가지를 종합적으로 고려하여 결정하게 된다.

흡인형 부상방식은 車體에 설치한 자석과 자성체로 구성된 트랙사이에 작용하는 흡인력을 이용하는 것으로 저속 또는 정지상태에서도 부상이 가능한 방식이다. 그러나 2차속에 유기되는 와전류에 의한 drag force의 영향등이 반발형보다 더 커 본질적으로 불안정한 것이 걸림으로 이를 보완하기 위한 장치를 해야 한다.

또한 반발형 부상방식은 超電導 자석이나 일반 常電導 자석, 또는 사다리형의 전류회로망, 독립된 폐회로의 전류회로망이 1차속이 되며 2차속은 임피던스의 도체판이나, 사다리꼴의 회로망, 독립된 폐회로 전류회로망로 구성되어 1차속에 의한 공극자속과 2차속에 유기되는 와전류사이의 반발력을 이용하는 방식이다. 이 경우 정지상태에서는 전혀 부상력이 발생하지 않으며 速度가 급속히 점점 증가하게 된다. 일반적으로 80[km/h] 정도에서 부터 부상시키고 있으며 흡인형에 비해 공극이 매우 큰 것이 특징이다.

이렇게 추진장치와 자기부상장치를 별개로 하는 경우에 비하여 최근에는 추진과 부상을 한 장치에서 동시에 발생시키고자 하는 새로운 형의 장치에 관한 연구가 시도되고 있다. 즉 1차속을, 'U'형 철심을 縱방향 또는 橫방향으로 길게 배열한 후 각각의 철심에 多相의 電流를 공급하면 橫방향으로의 자속 및 진행방향으로의 移動자계를 동시에 발생시킨다. 따라서 2차속의 와전류와 작용하여 자체적으로 추진력 및 부상력을 동시에 얻게 되는 방식으로 이를 片側式 橫자속 직선형 유도전동기(Transverse flux linear induction motor ; TFLIM)라 한다. 이 방식은 자기부상 및 추진을

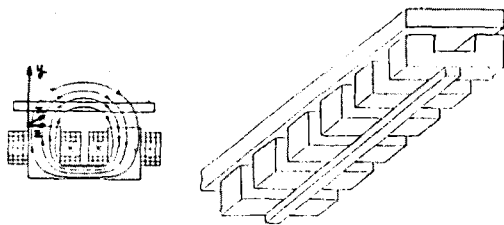
검출 수 있는 전동기로 극간격을 자로인 철심의 두께와 관계없이 길게 할 수 있어서 同期速度가 드므로 초고속 구동시스템에 매우 적합한 특징을 갖는다. 앞으로 초전도 재료를 이용하는 경우에는 이 TFLIM 장치 하나로 매우 강력한 추진력과 부상력을 발생시킬 수 있을 것이므로 추진장치와 부상장치를 일개의 시스템으로 하는 既存의 다른 방식들에 비하면 제작, 유지, 보수등의 여러 면에서 매우 유리한 방식이 될 수 있을 것으로 전망된다. 그러나 이 TFLIM은 새로운 방식으로 아직까지는 연구가 시작되는 段階이므로 그 방식 및 운전특성에 관하여 연구, 보고된 바가 거의 없다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 실정을 감안하여 본 연구에서는 편속식 TFLIM의 한 모델을 정하여 이를 전자장 해석법에 의해 운전특성을 해석하여 보았다.

2. TFLIM의 원리 및 특징

2.1 구동원리 및 특징

2.1.1 구동원리

TFLIM의 실제 모델은 아래의 그림 1과 같다.



(a) U형 철심 과 자로 (b) 철심의 배양
그림.1 TFLIM의 실제모델

Fig.1 The schematic diagram of a TFLIM

속 U형의, 극소간격을 적용시킨 철심의 양 다리에 그림 1(a)와 같이 권선을 감아 자속을 발생시킨다. 이 자속이 도체관을 횡방향인 X속 방향으로 쇄고하게 하므로써 도체관에 유기되는 와전류와 공극에서의 자속에 의하여 도체관과 철심 사이에 반발력이 발생하게 된다. 이러한 U형철심을 그림 1(b)와 같이 X 방향으로 이동자계가 발생되므로 반발력에 의한 부상 뿐만 아니라 X 방향으로의 추력이 발생하여 추진카지도 가능하게 된다.

2.1.2 특징

TFLIM은 자속이 U형 철심의 공극을 두번 건너 질러 폐회로를 구성하므로 자로인 철심의 두께에 거의 무관하게 극간격의 길이를 길게 할 수 있으므로 동기속도를 매우 크게 할 수 있어 일반 L.L.M에 비해 초고속 구동에 유리하다. TFLIM의

특징을 요약하면 아래와 같다.

- 1) 철심이 적게 들어 승상이 가벼워지고 재료비가 적게 든다.
- 2) Erd effect 와 Transverse edge effect가 비교적 작다.
- 3) 추진력, 부상력, 횡방향으로의힘(Lateral force)을 동시에 발생시킬 수 있다.
- 4) 극간격을 철심두께에 무관하게 크게 할 수 있어 동기속도가 크며 초고속 구동에 적합하다.
- 5) 초전도 코일을 쓰는 경우 추진력, 부상력이 커 일반 L.L.M에 비해 초고속 열차에 가장 효과적으로 쓰일 전망이다.
- 6) 1차속의 기차력 본포에 고조파가 크게 포함되므로 해석에 이를 고려해야 만한다.

2.2 해석모델

TFLIM의 운전특성인 부상력과 추진력의 해석을 위한 지배방정식을 유도하기 위하여 그림 1(a), 2와 같이 모델을 설정한다.

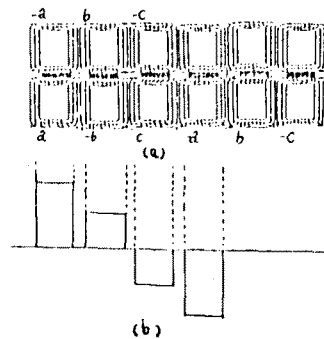


그림.2 3상권선 및 기차력본포

Fig.2 3 phase winding & emf

2.2.1 기차력과 전류본포

U형 철심 각각의 다리에 설치한 권선에 흐르는 고전류가 I, 권선수가 N이라 할 때 기차력은 NI가 된다. 그런데 권선속의 자속은 U형 철심위의 공극 자속에 비해 매우 작으므로 공극 자속의 횡방향으로의 본포는 그림 2(b)와 같이 펄스 모양의 본포로 생각 할 수 있다. 따라서 기차력 및 전류본포가 U형 철심위에 그림 2(b)의 모양으로 동기적인 본포를 하여 자속을 발생하는 것으로 생각 할 수 있다. 속 3상 교류 전원을 A, B, C로 공급하는 경우 U형 철심의 한쪽다리에 위의 것 만 고려하면 그림 2(b)의 모양으로 X 방향으로 편전류, 기차력, 자속이 다같이 본포하게 된다. 이때 전류는 철심외 면에 편전류 형태로 본포하는 것으로 생각하여 이를 푸리에 급수로 고조파를 고려하여 표현하면 아래와 같다.

$$i = 0.5 \frac{N I_m}{b} e^{j(\omega t - \frac{1}{2} \pi)} (1 + a_3^{2m} + a_5^{2m}) \quad (1)$$

2.2.2 제한조건 및 가정

해석을 하든 경우 실제현상 그대로는 불가능하므로 특성에 크게 영향을 주지 않는 범위 안에서 간이화해야만 한다. 이때 고려해야 할 조건은 아래와 같다.

- 1) 2 차속은 없다고 보아 표피효과를 무시한다.
- 2) 누설자속 및 주변자속은 주자속에 비하여 작으므로 무시한다.
- 3) 전원 및 기자력중이 시간적으로 정현적이다
- 4) 1차속은 무한히 길며 X 방향으로 움직인다.
- 5) 전류 및 기자력이 철심의 면위에 X,Z 평면에서 증가적으로 균일하게 분포하는 것으로 본다.
- 6) 철심의 투자율이 공극에서 보다 매우 크므로 기자력 및 자계가 공극에 만 집중되는 것으로 한다.

2.3 지배방정식 과 해

2.3.1 지배방정식

그림 1(a)의 U 형 철심 위에서의 공극자속과 도체판에서의 와전류를 계산하기 위한 벡터, 포텐셜을, 맥스웰 방정식을 기본으로 하는 지배방정식을 유도하여 구하기로 한다. 즉

공극에서
$$\nabla^2 A = 0 \tag{2}$$

2 차속에서
$$\nabla^2 A = \mu_0 \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} - v \times \nabla \times A \right) \tag{3}$$

또한 2차속에서의 와전류는

$$\vec{J} = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + v \frac{\partial A}{\partial z} \right) \tag{4}$$

벡터, 포텐셜과 공극자속은

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} \tag{5}$$

이다.

2.3.2 해

전류가 식(1)과 같이 X 방향으로 정현적으로 분포하며, 가정에서와 같이 철심의 면위 X,Z 평면에서 면전류로 균일하게 분포하는 것으로 보면 벡터, 포텐셜의 X,Z 성분 A_x, A_z 도 마찬가지로이다. 즉 $A = 0.5 A(y)$ 이다.

따라서 공극인 영역 1에서의 벡터, 포텐셜은 식(2)로부터

$$\frac{d^2 A_1(y)}{dy^2} - \left(\nu \frac{\pi}{\ell} \right)^2 A_1(y) = 0 \tag{6}$$

마찬가지로 영역 2인 2차속에서의 벡터, 포텐셜은 식(3)으로부터

$$\frac{d^2 A_2(y)}{dy^2} - \alpha^2 A_2(y) = 0 \tag{7}$$

$$\alpha^2 = \left(\nu \frac{\pi}{\ell} \right)^2 + \mu_0 \sigma \left\{ \omega - \nu(1-s) \left(\omega + \nu \frac{\pi}{\ell} \right) \right\}$$

여기서

그런데 식(6)으로 부터 1영역인 공극에서의 벡터 포텐셜의 Z 성분의 일반해를 구하면

$$A_{1z}(y) = \left(C_1 e^{\nu \frac{\pi}{\ell} y} + D_1 e^{-\nu \frac{\pi}{\ell} y} \right) \tag{8}$$

마찬가지로 2차속에서의 벡터, 포텐셜의 Z 성분 A_{2z} 는

$$A_{2z}(y) = \left(C_2 e^{\alpha y} + D_2 e^{-\alpha y} \right) \tag{9}$$

그러므로 A_{1z}, A_{2z} 는

$$A_{1z} = 0.5 A_{1z}(y) \sum_{j=1}^N b_j e^{j(s_1 \omega t - \nu \frac{\pi}{\ell} x)} \tag{10}$$

$$A_{2z} = 0.5 A_{2z}(y) \sum_{j=1}^N b_j e^{j(s_2 \omega t - \nu \frac{\pi}{\ell} x)} \tag{11}$$

또 2차 도체판에서의 와전류 밀도는 X,Z 평면상에서 X,Z 성분 J_x, J_z 가 있다. 우선 Z 성분 만 식(4)로부터 구하면

$$J_{2z} = -j\sigma \left[\omega - \nu(1-s) \left(\omega + \nu \frac{\pi}{\ell} \right) \right] \left[C_2 e^{\alpha y} + D_2 e^{-\alpha y} \right] \sum_{j=1}^N b_j e^{j(s_2 \omega t - \nu \frac{\pi}{\ell} x)} \tag{12}$$

2.4 경계조건

지배방정식의 해(10),(11)과 와전류의 식(12)에서 적분상수 C_1, C_2, D_1, D_2 를 결정하기 위하여 아래와 같은 경계조건을 설정한다. 즉 U 형 철심과 공극, 공극과 2차도체판의 경계에서 자속 B 와 자계의 새기 H 가 각각 법선성분과 접선성분이 같으므로 이를 조건식으로 하면 아래와 같다.

- 1) $y=0$ 인 U 형 철심과 공극의 경계에서 자속은 전류밀도 NI/W 의 의하여 발생되며, 또한 자계의 새기 H 는 철심속에서 투자율이 거의 같기 때문에 무시하며 표면에 등가면전류가 분포하는 것으로 보면

$$-\frac{\partial A_{1z}}{\partial x} \Big|_{y=0} = B_m \tag{13}$$

단 $B_m = \mu_0 \frac{NI}{W} \cdot \frac{1}{g}$

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_{1z}}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{NI}{W} \tag{14}$$

- 2) $y=\ell$ 인 공극과 2차 도체판에서의 경계에서는

$$-\frac{\partial A_{1z}}{\partial x} \Big|_{y=\ell} = -\frac{\partial A_{2z}}{\partial x} \Big|_{y=\ell} \tag{15}$$

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_{1z}}{\partial y} \Big|_{y=\ell} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_{2z}}{\partial y} \Big|_{y=\ell} \tag{16}$$

2.5 경계조건의 적용

식(13)에서(16)까지의 경계조건에 식(11),(12)를 적용하여 대입하여 정리하면

$$-\nu \frac{\pi}{\ell} (C_1 + D_1) = \mu_0 \frac{NI}{W} \cdot \frac{1}{g} \tag{17}$$

$$v \frac{\pi}{2} (C_1 - D_1) = \frac{NI}{W} \quad (18)$$

$$C_1 e^{v \frac{\pi}{2} g} + D_1 e^{-v \frac{\pi}{2} g} = C_2 e^{\alpha g} + D_2 e^{-\alpha g} \quad (19)$$

$$v \frac{\pi}{2} (C_1 e^{v \frac{\pi}{2} g} - D_1 e^{-v \frac{\pi}{2} g}) = \alpha (C_2 e^{\alpha g} - D_2 e^{-\alpha g}) \quad (20)$$

$$C_1 = \frac{2}{2\pi v} \cdot \frac{NI}{W} (j\mu_0 \frac{1}{g} + 1) \quad (21)$$

$$D_1 = \frac{2}{2\pi v} \cdot \frac{NI}{W} (j\mu_0 \frac{1}{g} - 1) \quad (22)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} e^{-\alpha g} \left\{ C_1 e^{v \frac{\pi}{2} g} (1 + v \frac{\pi}{2} \frac{1}{\alpha}) + D_1 e^{-v \frac{\pi}{2} g} (1 - v \frac{\pi}{2} \frac{1}{\alpha}) \right\} \quad (23)$$

$$D_2 = \frac{1}{2} e^{\alpha g} \left\{ C_1 e^{v \frac{\pi}{2} g} (1 - v \frac{\pi}{2} \frac{1}{\alpha}) + D_1 e^{-v \frac{\pi}{2} g} (1 + v \frac{\pi}{2} \frac{1}{\alpha}) \right\} \quad (24)$$

2.6 부상력과 수력특성식

TFLIM의 철심과 2차도체판 사이에 작용하는 부상력 \$f_y\$ 와 수력 \$f_x\$ 는 Lorentz의 힘 방정식으로 부여 구한다. 즉,

$$f_x = 1/2 \operatorname{Re}(-J_z \cdot B_y 2^*) [N/m] \quad (25)$$

$$f_y = 1/2 \operatorname{Re}(J_z \cdot B_x 2^*) [N/m] \quad (26)$$

$$f_z = 1/2 \operatorname{Re}(J_x \cdot B_y 2^*) [N/m] \quad (27)$$

그런데 실제의 힘은 U형 철심의 다리(leg)가 두개이며 각각에 기자력이 분포되므로 식(25), (26), (27)에서 구한 식에서 2배로 하면 된다. 한파 장 당의 힘은

$$F_x = 2 \cdot R \int_0^{2\pi} f_x \cdot dx \quad (28)$$

\$R\$ 은 U형 철심의 \$Z\$ 방향 두께 [m]
 단 \$Re\$는 실수부, \$*\$는 공액복소수

3. 결론

TFLIM의 운전특성을 전자장 이론을 적용하여 해석 하므로써 앞으로의 이 분야의 연구 및 응용연구의 기본자료를 제시하게 되었다.

4. 참고문헌

1. E.R. Laithwaite "Linear electric machines-A personal view" Proc. of the IEEE, vol-63, no-2, 1975, 250-290
 2. I. Boldea & S.A. Nasar "Linear motion electromagnetic systems" John Wiley & Sons, 1985
 3. S.A. Nasar & I. Boldea "Linear motion electric machines" John-Wiley & sons, 1976
 4. H. Yamada "Hand book of linear induction motor applications" 日本 工業調査會, 1986, 12
 5. J.F. Gieras "Transverse flux electrodynamic levitation system" Inter Confer. on MAGLEV Transport '85, 207-215, 1985.

tion system" Inter Confer. on MAGLEV Transport '85, 207-215, 1985.

6. I. Boldea "Optimal design of attraction levitation magnets including the end effect" Electric Machines and Electromechanics, 6:57-66, 1981.