

원통형 선형 유도전동기의 2차축 처짐에 관한 연구

정 상 용, 천 장 성, 임 정 필, 정 현 교
 서울대학교 전기공학부 전기역학연구실

A Study on droop of Tubular Type Linear Induction Motor

Sang-Yong Jung, Jang-Sung Chun, Hyun-Kyo Jung
 Electromechanics lab. School of engineering, seoul national university

Abstract-In the case of long secondary (applied in long distance), as it is established horizontal, the defects of droop arises resulting damage of entire system. Actually, it is difficult to expect reasonable characteristics and desirable operating in that case. This paper is about numerical analysis of secondary droop, non-symmetric and position displacement problems. In the base of this paper, the correction of mechanical difficulties in practical manufacturing and optimal design of TLIM considering these aspects can be progressed successively.

Keywords: TLIM, droop

1. 서 론

과거 직선운동이 필요한 곳은 회전기에서 기어등을 써서 회전 추력을 직선 추력으로 전이 시켜 이용하였다. 그러나 이러한 변환 장치에 의한 에너지 손실이나 비효율성을 제거하고 또한 선형 운동이 요구되는 시스템의 발달과 함께, 비록 효율이나 역률 면에서는 회전기에 비해 떨어지나 선형 시스템에서의 경우 선형 기기를 이용하여 직접 직선 추력을 얻음으로써 여러 가지 장점을 지니게 되었다. 특히 교통 운반용을 비롯하여 산업용, 사무용 등에서 널리 응용되고 있다.

여러 가지 선형기기 중에서 선형 유도 전동기는 서보 성능을 비롯, 높은 추력, 높은 질량대 추력비등을 지니며 주로 짧은 거리 운송이나 오실레이터, 엘리베이터 등에서 많이 이용 되고 있다. 본 논문은 이러한 선형 유도 전동기 중에서 원통형 선형 유도 전동기에서의 처짐에 관한 연구이다. 일반적으로 엘리베이터등에서 선형 유도 전동기가 이용될 때, 전동기는 수직으로 세워져 2차축의 변위가 발생하지 않지만 수평으로 위치하여 구동 될 때에는 자중등의 이유로 아래로 처짐이 발생하게 된다. 그럼으로써 공극이 일정치 않게 되며 직선 추력(thrust force)외에도 수직력(normal force)등이 나타나게 되어 이상현상이 벌어지게 된다. 일반적으로 SLIM을 제외한 DSLIM, TLIM등에서는 구조상으로 대칭적이므로 이 성분을 고려하지 않는 것이 대부분이다. 그러나 실제 작동문 등에서 이용되듯이, 선형 모터가 수평적으로 위치하게 되면 처짐 현상이 벌어지게 되며 선형기기의 정확한 특성을 규명하려면 이러한 처짐 해석이 필수적이다. 이와 같은 처짐의 주 원인은 주로 2차축의 자중에 의한 것인데 일반적으로 선형 기기에서는 전동기 외부에 지지대나 베어링등으로 중심을 맞추게 된다. 그러나 전동기의 길이가 무척 길고 2차축의 두께가 얇으며 강도가 약한 경우 이러한 현상은 더욱 심하게 나타나게 되며

외부적으로 지지하기 힘들게 된다. 따라서 본 논문의 해석 모델은 일반적인 선형 기기의 구조와 같으면서 이와 같은 점을 지니고 있는 선형 기기(총 길이 1.3 [m], 2차축 직경 10[mm])에 대하여 이루어 졌다.

일반적으로 전동기를 해석하는 경우엔 공극의 균일함과 각 구조상의 균일함(homogeneous)을 이용하여 쉽게 해를 구할 수 있지만 처짐 해석의 경우 공극이 균일하지 않고 그 처짐의 정도가 다항 함수(polynomial)의 비선형이므로 해석이 수월치 않다. 따라서 해석 모델을 근사화를 최대한 시키지 않고 물리적인 다중층 영역으로 나누었으며 각각의 영역별로 자기 벡터 포텐셜의 방정식을 구한 뒤 방정식의 해를 구하게 된다. 그리고 각 해의 미지수는 경계 조건으로 구하게 된다.

이론적인 결과를 토대로 이 모델을 유한 요소 해석으로도 적용해 보았으며 실제 자기력선의 방향을 구조상으로 살펴 볼 수가 있다. 이와 같은 모든 해석은 처짐이 일어나지 않는 표준 모델에 대해서도 병행하여 이루어졌으며 실제 여러 가지 계수를 구하는 과정은 전달 행렬의 개념을 도입하여 해결하였다.

2. TLIM 처짐의 특성 해석

2.1 물리적인 2차축의 처짐

일반적인 선형 유도 전동기의 2차축은 가운데 Back-iron이 있으며 그 둘레에 알루미늄으로 둘러싸는 형식으로 보통 이루어져 있다. 여기서의 DSLIM 2차축도 그러한 구조로 이루어져있으며 기계적인 강도에 따라 처짐의 정도를 함수 형식으로 정형화 시킬수가 있다.

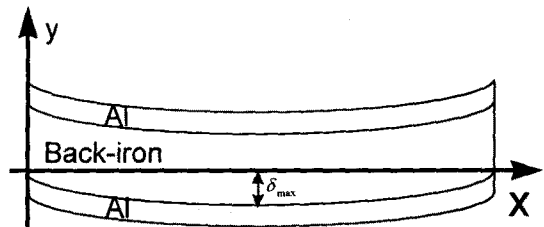


Fig.1 DSLIM 2차축의 물리적인 처짐 모델

$$\delta = \frac{\omega_0 x}{24EI} (L^3 - 2Lx^2 + x^3)$$

여기서 E : effective modulus of elasticity [Nm]
 (steel E:205 × 10⁶ aluminum E:69 × 10⁶)

I : the moment of inertia [m⁴] = ∫_A y² dA

그리고 최대로 처지는 변위는 δ^{max} = 1.5129(mm)가 된다. 물론 위의 식은 물리적으로 처지는 양만을 나타내므로 실제 2차축 모델에 적용이 되는 경우엔 평행 이동

만사키주면 된다.

2.2 해석 영역 및 특성 방정식

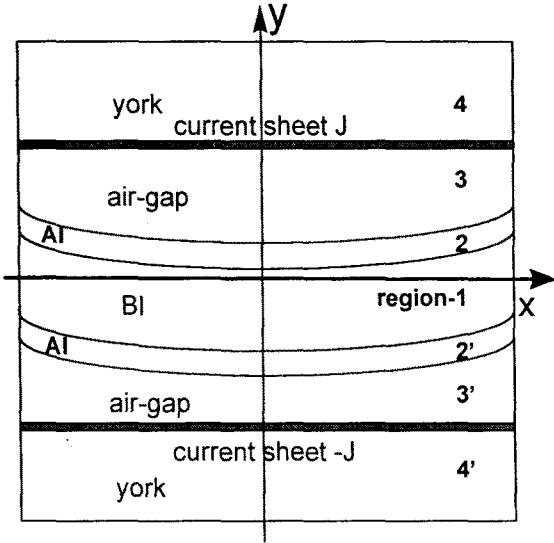


Fig. 2 다중층 해석 영역

$$\nabla^2 A = \mu\sigma \frac{dA}{dt} \quad A: \text{magnetic vector potential} \quad (1)$$

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + v \frac{\partial A}{\partial x} \quad (2)$$

$$\nabla^2 A = \mu\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + v\mu\sigma \frac{\partial A}{\partial x} \quad (3)$$

여기서 $A = A(x, y)\exp(-j\omega t) = A(y)\exp(j\omega t - kx)$ 가 된다. 따라서 해석식으로 다시 쓰면

$$\frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial y^2} = \mu\sigma \left(\frac{\partial A(x, y)}{\partial t} + v \frac{\partial A(x, y)}{\partial x} \right) \quad (4)$$

위의 해석 모델을 살펴보면 도전을 있는 영역은 2차측 뿐이 없다. 따라서 2차측을 제외한 모든 영역에서는 (4)식의 오른쪽 항이 0이 된다. 위의 식을 도전율에 따라 정리하면 아래와 같다.

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - (k^2 + jk\mu\sigma U_s)A = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - k^2 A = 0 \quad (6)$$

$a^2 = (k^2 + jk\mu\sigma U_s)$ 라 두면 각 영역별 자기 포텐셜 함수는 도전율에 따라 식 (5), (6)을 풀면 된다. 각각 $A(x, y) = (A\exp(ay) + B\exp(-ay))\exp(j(\omega t - kx))$ (7) $A(x, y) = (C\exp(ky) + D\exp(-ky))\exp(j(\omega t - kx))$ (8) 위 식 (7)과 (8)의 해를 구할때 자계 방정식은 총 미지수 12개를 가지며 각각이 $A(x), B(x), C(x), \dots$ 등으로 x 에 대한 함수 꼴의 형태가 된다. 왜냐하면 이들은 각 영역간의 경계 조건으로 구해야 하는데 각각의 x 에 따라 그 y 값이 달라지기 때문이다.

경계 조건은 각 영역간에 다음과 같다.

$$H_{1t} - H_{2t} = J, \quad \frac{1}{\mu_{1t}} B_{1t} - \frac{1}{\mu_{2t}} B_{2t} = J \quad (9)$$

$$\frac{1}{\mu_{1t}} (\nabla \times A) \cdot \vec{t} - \frac{1}{\mu_{2t}} (\nabla \times A) \cdot \vec{t} = J \quad (10)$$

$$B_{1n} = B_{2n}$$

$$(\nabla \times A) \cdot \vec{n} = (\nabla \times A) \cdot \vec{n} \quad (11)$$

이때 \vec{t} 는 각각의 x 에 대한 $g(x)$ 의 접선 방향 벡터이며 \vec{n} 은 법선 방향 벡터이다. 이를 x, y 식으로 다시 바꾸면 각각 다음과 같다.

$$\frac{1}{\mu_a} \left(\frac{\partial A_a}{\partial y} - g'(x) \frac{\partial A_a}{\partial y} \right) - \frac{1}{\mu_b} \left(\frac{\partial A_b}{\partial y} - g'(x) \frac{\partial A_b}{\partial y} \right) = J \quad (12)$$

$$g'(x) \frac{\partial A_a}{\partial y} + \frac{\partial A_a}{\partial x} = g'(x) \frac{\partial A_b}{\partial y} + \frac{\partial A_b}{\partial x} \quad (13)$$

식 (12)과 식 (13)를 이용하여 각각의 경계에서 만족하는 값을 찾아야 하는데 각 영역 별로 식을 전개하면 12개의 식을 찾을 수 있으므로 유일해를 찾을수가 있게 된다. 그리고 각 영역 $g1(x), g2(x), g3(x), g4(x)$ 은 처짐 정도를 나타내는 δ 함수의 이동된 함수 형태이다. 즉,

$y=c$ 에서

$$E(x) e^{kc} + F(x) e^{-kc} - G(x) e^{-kc} = 0 \quad (14)$$

$$E(x) \frac{k}{\mu_0} e^{kc} - F(x) \frac{k}{\mu_0} e^{-kc} = -G(x) \frac{k}{\mu_4} e^{-kc} + J \quad (15)$$

$y=-c$ 에서

$$E'(x) e^{-kc} + F'(x) e^{kc} - G(x) e^{-kc} = 0 \quad (16)$$

$$E'(x) \frac{k}{\mu_0} e^{-kc} - F'(x) \frac{k}{\mu_0} e^{kc} = G'(x) \frac{k}{\mu_4} e^{-kc} + J \quad (17)$$

그리고 임의의 $g(x)$ 에서는 다음과 같다.

$$P(x) [g'(x) \alpha_a e^{\alpha_a g(x)} - j \alpha_a e^{\alpha_a g(x)}] + Q(x) [-g'(x) \alpha_a e^{-\alpha_a g(x)} - j \alpha_a e^{-\alpha_a g(x)}] = R(x) [-g'(x) \alpha_b e^{\alpha_b g(x)} + j \alpha_b e^{\alpha_b g(x)}] + S(x) [g'(x) \alpha_b e^{-\alpha_b g(x)} + j \alpha_b e^{-\alpha_b g(x)}] \quad (18)$$

$$P(x) \left[\frac{\alpha_a}{\mu_a} e^{\alpha_a g(x)} + \frac{g'(x) j \alpha_a}{\mu_a} e^{\alpha_a g(x)} \right] + Q(x) \left[-\frac{\alpha_a}{\mu_a} e^{-\alpha_a g(x)} + \frac{g'(x) j \alpha_a}{\mu_a} e^{-\alpha_a g(x)} \right] = R(x) \left[-\frac{\alpha_b}{\mu_b} e^{\alpha_b g(x)} - \frac{g'(x) j \alpha_b}{\mu_b} e^{\alpha_b g(x)} \right] + S(x) \left[\frac{\alpha_b}{\mu_b} e^{-\alpha_b g(x)} - \frac{g'(x) j \alpha_b}{\mu_b} e^{-\alpha_b g(x)} \right] \quad (19)$$

2.3 해석 결과 및 분석

해석이 이루어진 실제 전동기의 변수들은 다음과 같다. Table 1. 시작기 사양

총 길이	1.3[m]	외곽 DIA.	70[mm]
슬롯 폭	24.5[mm]	치 폭	18.8[mm]
슬롯 깊이	18[mm]	요크 두께	5[mm]
권선수	270[turns]	주파수	1.394[Hz]
역률	0.609	전력	0.021[Kw]

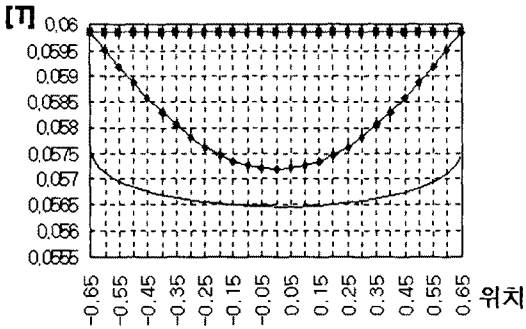


Fig 3. 위쪽 공극에서의 Bx

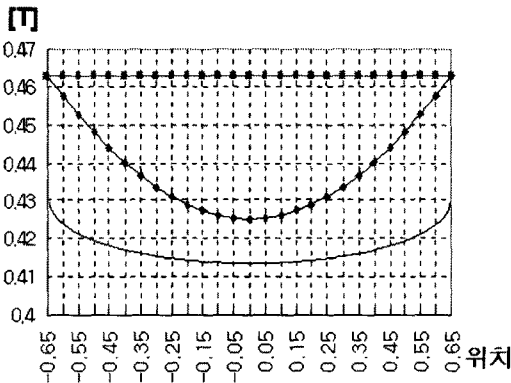


Fig 4. 위쪽 공극에서의 By

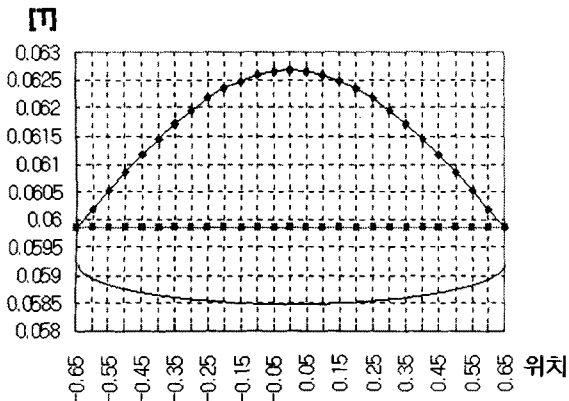


Fig 5. 아래쪽 공극에서의 Bx

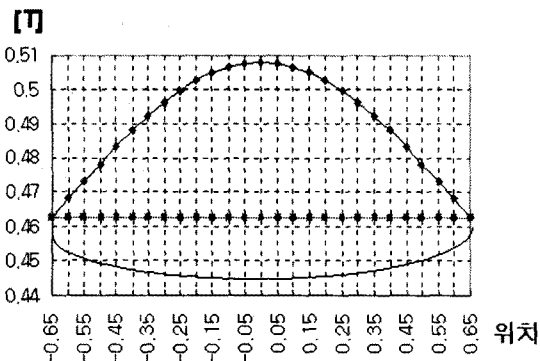


Fig 6. 아래쪽 공극에서의 By

위의 시작기는 저속 구동(0.4(m/sec)) 원통형 선형 기기의 한 모델에서 유추하여 나온 모델이다. 이 모델은 길이가 길면서 2차축의 외경이 작아 처짐의 정도가 무척 심하다. 여기서 물리적인 처짐의 정도를 결정할 때에는 effective modulus의 값을 주었는데 이는 2차축이 Back-iron과 도체(여기서는 Al)로 이루어졌기 때문이다. 여기서 Back-iron은 투자율 300으로 1차축 요크는 1000으로 두고 했으며 2차축 알루미늄의 도전율은 일반적인 SM47C의 값인 $2.8e+7$ 을 주었고 Back-iron에서의 도전율은 알루미늄의 90%정도로 준 뒤 해석을 하였다. 위의 그림은 위쪽 과 아래쪽 공극 부분에서의 x, y방향 자속 밀도를 나타내며 형상에서 알 수 있듯이 공극의 길이가 작은 영역에서의 자속밀도 값이 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 자속밀도값의 변화는 각 영역에서 재료의 차이로 설명할 수 있으며 또한 상하 비대칭은 직선 추력 및 수직력에도 큰 영향을 주게 된다. 또한 위와 같은 결과를 나타내는 등가 전위 곡선은 유한 요소 해석으로 볼수가 있는데 중앙에서 자속의 흐름이 처짐의 경우 비 대칭임을 알수가 있다.



Fig 7. 처짐이 일어난 TLIM

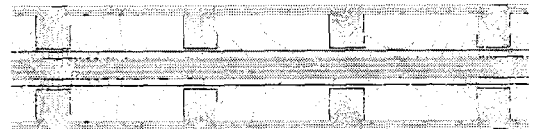


Fig 8. 처짐이 일어나지 않은 TLIM

3. 결 론

본 논문은 실제 선형 기기에서 2차축이 자중 등의 이유로 처짐이 생길 때 나타나는 이상현상을 다루었다. 처짐으로 생긴 구조상에서는 실제 자속 밀도의 값과 flux 방향등에서 비 대칭성이 나타나게 되었으며 이는 앞 단에서 언급한 여러가지 단점으로 나타나게 된다. 또한 본 논문은 처짐의 정도를 비선형 함수로 정형화하여 이를 경계 조건으로 해결하는 자체 방정식을 해석하였다.

앞으로 선형기기가 수평적으로 위치하여 처짐이 생기는 경우 이러한 이상 현상을 충분히 고려된 설계를 해야할 것이며 좀더 발전된 연구가 필요하다. 이 논문의 결과와 방식을 토대로 앞으로 추력에 대한 특성과 2차원 와전류 문제, 철손 등의 해석이 추가적으로 이루어질 것이며 또한 TLIM에 적용하여 3차원 해석으로도 발전시킬 전망이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Ir.D.J.de Groot and Pro.C.H.Heuvelman, "Tubular linear induction motor for use as servo actuator". *Proc. of IEE*, Vol.137, Pt.B, No4, July, 1990, pp273-280
- [2] S.H.Crandal, N.C.Dahl, T.J.Lardner, *The mechanics of solids*, 2nd ed. Massachusetts Ins. of Tecnology.
- [3] S.Yamamura, *Theory of linear induction motors*, Univ.Tokyo press, John wiley & son, 1979