

2차측 도체바의 두께에 따른 TLIM의 특성 분석

채승희, 김지민, 이병화, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

Characteristics Analysis according to Thickness of Secondary Conductor in Tubular Linear Induction Motor

Seung-Hee Chae, Ji-min kim, Byeong-Hwa Lee, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - The purpose of this paper is Characteristics Analysis according to thickness of Secondary Conductor in Tubular Linear Induction Motor(TLIM). Linear motors make good used of several applications as pumps and linear actuator.

Characteristic equations of TLIM are obtained form voltage equation. And parameters of voltage equation are calculated.

1. 서 론

일반적으로 많은 산업기기에는 회전형(Rotary type) 모터가 많이 사용되고 있지만, 이러한 회전형 모터를 선형운동 하는 시스템에 적용하기에는 한계가 있다. 선형운동 시스템에 회전형 모터가 사용되면 gear나 ball screw, belt와 같은 기계적 마찰로 인한 손실이 발생하게 되고, 복잡한 회로 구성문제와 효율 측면에서도 합리적이지 않다. 결국 직선 추력을 직접 발생시킬 수 있는 직선형 유도전동기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 그 응용분야가 다양해지고 있다. 그 중에 한 가지가 바로 Tubular Linear Induction Motor(TLIM)이다[1].

TLIM의 장점은 설계가 쉽고 견고하다는 점이다. 또한 낮은 속도에서 구동되기 때문에 dynamic end effect는 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 가지며, static end effect는 최소화 시킬 수 있다[2]. 하지만 Single-sided Linear Induction Motor(SLIM)와 비교했을 때, 설계 과정에서 2차 측 도체바에서의 skin effect분석이나 철심의 포화현상 등 특별히 주의해야 할 복잡한 물리적 현상을 고려해야 한다[2],[3].

따라서 본 논문에서는 2차 측 도체바의 두께의 변화에 따른 TLIM의 Parameters를 산정한 후, 등가회로를 이용하여 특성해석을 하였다. 2차 측 도체바의 두께 변화에 따라 Slip에 따른 추력(Thrust force)과 효율, 역률을 분석한 후 TLIM의 사용 용도에 맞게 도체바의 두께를 결정할 수 있는 방안을 제시하였다.

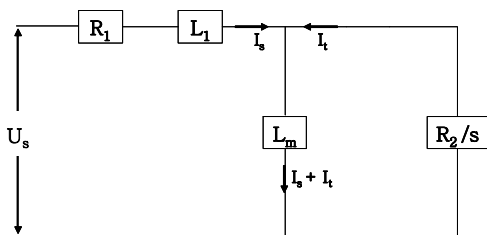
2. TLIM의 해석 이론

<그림 1>은 각 상 당 TLIM의 등가회로이다. 식을 단순화하기 위하여 2차 측의 leakage reactance는 무시하였고 극수는 4극으로 설정하였다. Core saturation과 2차 측의 Skin effect는 무시되었다. 단순화된 이 회로로부터 특성방정식을 유도하기 위해 식에 사용되는 parameters를 다음과 같이 산정할 수 있다. 즉, Magnetizing reactance와 1차 측 Reactance, 1차, 2차 측 Resistance는 식 (1)~(4)와 같다[1].

$$X_m = \frac{6\mu_0\omega}{\pi^2} (K_w N)^2 \frac{\tau(\pi D_0)}{pg} \quad (1)$$

$$X_1 \cong \frac{2\pi\mu_0\omega D_0 \lambda_c N^2}{pq} \quad (2)$$

$$r_1 = \frac{\pi\rho_c g K_p^2 m^2 D_0 N^2}{K_f K_d p r^2} \quad (3)$$



<그림 1> 상 당 TLIM의 등가회로

$$r_2 = \frac{6\pi D}{\pi} \rho_r (K_w N)^2 \quad (4)$$

여기서, g 는 air-gap, N 은 1차 측 상당 턴 수, K_w 는 winding factor, τ 는 pole pitch, p 는 pole pair수, D_0 는 1차 측의 내경, $\rho_r = \rho/d$ 는 2차 측의 알루미늄 volume resistivity, d 는 2차 측 도체바의 두께, ρ_c 는 구리의 volume resistivity, q 는 매 극 매 상당 slot수이다.

리니어 모터의 성능을 평가하는 척도로써 Laithwaite가 제안한 전기 회로와 자기회로의 결합도로 나타내는 Goodness factor(G)가 일반적으로 많이 사용되며, 등가회로 상에서 보면 다음 식으로 정의된다.

$$G = \frac{X_m}{r_2} \quad (5)$$

구해진 parameters로부터 <그림1>에서 전압방정식과 특성방정식을 결정할 수 있다. 전압방정식은 다음과 같이 구할 수 있다[1].

$$U_s = I_s (R_1 + j\omega_1 L_1) + (I_s + I_1)(j\omega_1 L_m) \quad (6)$$

$$0 = I_1 \left(\frac{R_2}{s}\right) + (I_s + I_1)(j\omega_1 L_m) \quad (7)$$

여기서, U_s 는 상당 2차 측 전압의 실효값, ω_1 는 1차 측의 angular frequency, I_s , I_1 는 각각 1차 측과 2차 측의 입력전압, L_m 은 상호인덕턴스이다.

다음으로 Lorenz's Law로부터 상 당 thrust force를 구할 수 있다. Thrust force(F_z)는 다음과 같다.

$$F_z = 3p \frac{\omega_1}{v_0} I_s^2 \frac{M_{ts}^2}{L_{tt}} \frac{(\omega_1 s) T_t}{1 + [(\omega_1 s) T_t]^2} \quad (8)$$

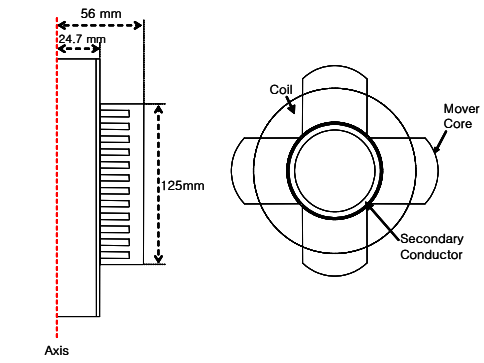
여기서, v_0 는 동기속도, M_{ts} 는 2차 측의 상호인덕턴스, L_{tt} 는 2차 측의 자기인덕턴스(self-inductance) s 는 슬립, T_t 는 Electric time constant이다.

그리고 등가회로의 입력전류는 입력전압으로부터 계산된다.

$$I_s = U_s \frac{(R_2/s) + j\omega_1 L_m}{[R_1 + j\omega_1 (L_1 + L_m)][(R_2/s) + j\omega_1 L_m] + (\omega_1 L_m)^2} \quad (9)$$

또한, 기계적 출력은 식 (10)과 같이 표현될 수 있다. Thrust force (F_z)와 속도(v_0)의 곱은 기계적 출력(P)과 같다.

$$P = F_z v = F_z (1-s)v_0 \quad (10)$$



(a) side direction (b) upper direction
<그림 2> TLIM의 Structure & Cross-section view

끝으로, 역률($\cos\phi$)과 효율(η_1)은 식 (11), (12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos\phi = \frac{F_z 2\pi f_1 + 3R_1 I_s^2}{3pU_s I_s} \quad (11)$$

$$\eta_1 = \frac{F_z 2\pi f_1 (1-s)}{F_z 2\pi f_1 + 3R_1 I_s^2} \quad (12)$$

여기서, f_1 는 1차 축의 frequency이다.

본 논문에서는 2차 축 도체바의 Inner diameter를 변화시키는 방법으로 2차 축 도체바의 두께를 변화시켜 그에 따른 Thrust Force, 역률, 효율의 특성을 해석하도록 하였다.

3. TLIM의 특성해석

3.1 Model의 사양 및 형상

<그림 2>는 TLIM의 기본 model이다[4]. 1차 축은 철심core와 전기자 core로 구성되어 있고 2차 축은 알루미늄 튜브와 magnetic return yoke를 위한 철심으로 구성되어있다.

<표 1>에 TLIM model에 대한 specifications가 제시되어있다.

또한 2차 축 도체바의 두께를 <표 2>와 같이 변화시켜가며 특성해석을 하였다.

2차 축 도체바에서 전류가 흐를 시에 Skin effect를 고려해야 한다. 설계 모델에 대한 정격 시 skin depth는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f_1 \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi(15)(3.63 \times 10^7)(4\pi \times 10^{-7})}} = 0.0216 [m] \quad (13)$$

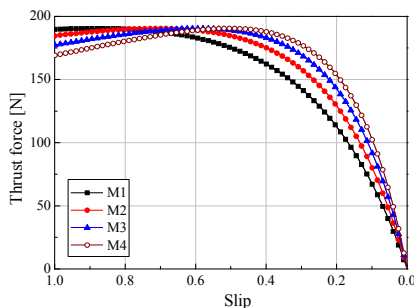
여기서, μ 는 알루미늄의 투자율, σ 는 알루미늄의 도전율이다. 우리가 확인하고자 하는 2차 축 도체바의 두께는 Skin depth를 고려하지 않아도 되는 범위에 있으므로 그 영향을 무시하였다.

<표 1> TLIM의 specifications

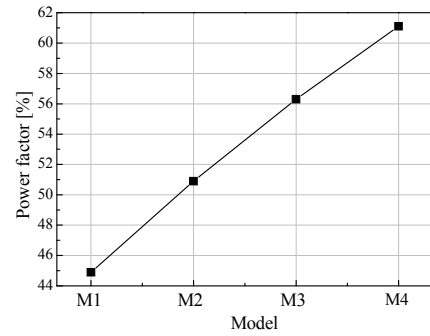
Items	Specifications	Value	Unit
Normal	Voltage	50	V
	Frequency	15	Hz
	Length	125	mm
1차 축	Outer Diameter	112	mm
	Inner Diameter	25.3	mm
	Pole/slot number	4/12	
2차 축	Series Turn number/ Phase number	400	
	Diameter	24.7	mm
	Material	Aluminum	
Air gap length		0.5	mm

<표 2> 모델별 2차 축 도체바의 두께

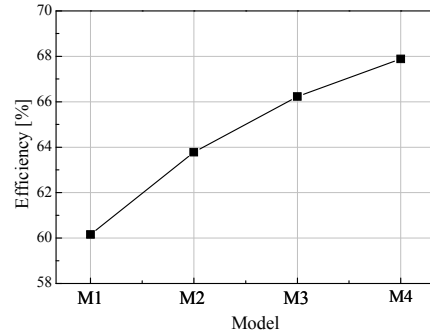
모델	M1	M2	M3	M4
도체 두께 [mm]	12	15	18	21
Goodness Factor (기동 시)	1.11	1.39	1.67	1.95



<그림 3> Slip에 따른 모델별 Thrust force



<그림 4> 모델별 Power factor (slip=0.05)



<그림 5> 모델별 Efficiency (slip=0.05)

3.2 특성해석 결과

<그림 3>은 Slip에 따른 모델별 Thrust force를 해석한 결과를 나타낸 것이다. 해석결과 도체의 두께가 늘어날수록 기동 시 높은 Thrust force를 낼 수 있음을 확인 할 수 있었다. 또한 이때의 파라미터를 이용하여 Goodness factor를 계산했을 경우 <표 2>에 나타나 있듯이 M1의 경우 1에 가까운 값을 가짐을 확인할 수 있다.

정격 시(slip=0.05)에서의 모델별 효율, 역률은 <그림 4>, <그림 5>와 같다. 특성을 살펴보면, 두께가 두꺼운 모델일수록 역률과 효율이 좋게 나타남을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 2차 축 도체바의 두께에 따른 TLIM의 특성을 해석하였다. 선형운동 시스템중 하나인 TLIM을 설계하는데 있어 사용용도에 따라 도체바 두께를 결정하는 것은 중요한 요소이다. 기동 시에 큰 힘이 필요한 경우에는 Goodness factor 값이 1에 가까운 즉 도체바 두께가 얇은 설계가 필요하고, 정격 시 높은 효율과 역률이 필요한 경우에는 상대적으로 도체바가 두꺼운 것이 유리하다. 이때의 도체바 두께는 Skin depth를 고려하여 설계되어야 할 것이다. 또한 모터의 제작비용 또한 설계의 중요한 요소가 되므로 상황에 맞는 유연한 설계가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ir. D. F. de Groot, Prof. D. J. Heuveiman "Tubular Linear Induction Motor for use as a servo actuator", IEEE Transaction On Magnetics, vol. 38, No. 2, pp.1165-1168, March 2002.
- [2] 홍정표 외 3인, "The Improvement of the Characteristics in Tubular Linear induction Motor (International conf.)", Abstracts of the International Symposium on Advanced Computational and Design Techniques in Applied Electromagnetic Systems, pp.196, Seoul, Korea, 1994
- [3] 홍정표 외 4인, "The Optimum Design of the Slit Type Linear Induction Motor", Procd. of IEEE CEFC '96, pp.166, 1996
- [4] Ching-Chih Tsai, Ssu-Min Hu, Chan-Kan Chang "Vertical Liner Motion System Driven by a Tubular Linear Induction Motor", IEE Proceeding, International Conference on Mechatronics, pp.162-167, July 2005