

엘리베이터용 TLIM의 특성해석

임 달호 김 영중 윤 상백 황 상연
한양대학교 전기공학과

Characteristics Analysis of Tubular Linear Induction Motor Specially-designed for Elevator

Dal-Ho Im Young-Joong Kim Sang-Baeck Yoon Sang-Yeon Hwang
Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ.

ABSTRACT

This paper presents the analysis method of TLIM, for the purpose of developing linear induction motor drive for elevators. The transfer matrix to multilayer on cylindrical coordinate is derived. The equivalent circuit constructed from coupling complex phasor makes it possible to obtain characteristics of TLIM. The validity of the method is verified by comparing the experimental and theoretical results for a pilot machine in locked status.

I. 서론

최근 Servo 시스템, 운송시스템 및 대출력의 수직운동 액츄에이터 등의 폭넓은 분야에서 리니어 모터를 활용하려는 연구가 많이 시도되고 있다. 특히 리니어모터를 엘리베이터 구동장치로 활용하려는 연구는 활발히 진행되고 있으며, 그 예로서 일본 OTIS사의 LIM(Linear Induction Motor)을 이용한 소용량 저속 엘리베이터 시스템의 개발을 들수있다. 발표자료에 의하면 LIM을 이용한 엘리베이터 시스템은 기존 시스템에 비해 여러가지 장점을 가지고 있는 것으로 나타나있다[1].

따라서 본 연구에서는 구조상으로 수직력의 영향이 적어 안정 운전의 범위가 넓은 Tubular-LIM (TLIM)을 이용한 대용량 중속 이상의 엘리베이터 시스템 개발을 목적으로 대용량 TLIM에 적합한 해석방법을 제시하였다. 또한 시작기의 제작 및 실험을 통하여 구속상태에서 기동특성을 계산치와 비교함으로써 해석방법의 정밀성을 살펴보았다.

II. 적용이론

TLIM의 구조는 일반적으로 그림 1과 같으며 해석상의 편의를

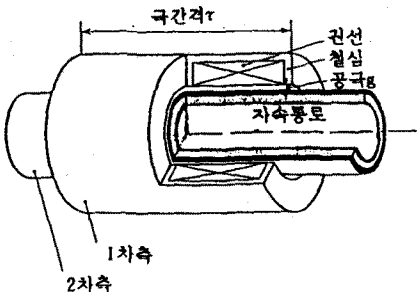


그림 1 해석 모델

위하여 이하의 가정을 두어 그림 2와 같이 해석대상을 근사화하여 이론을 전개한다.

- 1차축 철심과 slot을 Current Sheet로 대체하고 이를 Cater 계수로 보정한다.
- 철심의 성층폭은 매우 작아서 도전율은 0이다.
- 1차철심은 $r=\infty$ 까지 존재한다.
- z 방향으로의 무한대의 길이를 가지며 저속으로 운행되므로 단부효과를 무시할수 있다.

1. 원통좌표계에서의 다층영역 해석

편평형 LIM의 경우 자계에 대한 미분방정식의 해는 지수함수로 되지만 회전형 유도기 및 TLIM의 지배방정식의 해는 변형 Bessel 함수로 된다. 회전형 유도기의 경우 공극이 매우 작으므로 지수함수 형태의 해로 근사할 수 있으나 TLIM에서는 공극이 커서 Bessel 방정식을 풀어야 한다[2]. 본 절에서는 정밀도를 높이기 위하여 Maxwell 방정식을 풀어서 원통좌표계에서의 다층영역에 대한 변환 Matrix를 구성한다[3].

그림 3은 일반영역 n 을 나타내고 있으며 영역 n 에서, 아래쪽 경계면의 자속밀도의 r 성분을 B_{n-1} 자계의 z 성분을 H_{n-1} 로,

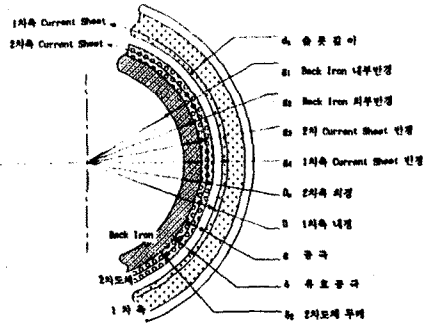


그림 2 TLIM의 다층영역 단면도

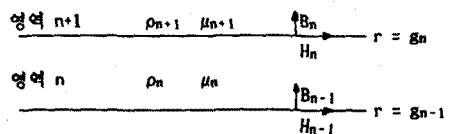


그림 3 일반영역 n

위쪽 경계면의 자속밀도의 r성분을 B_r 자계의 z성분을 H_z으로 표시 한다.

해석대상을 고려한 경계조건은 다음과 같다.

1. 각 영역의 경계면에서 B_r 는 연속이다.
2. r = ∞, r = 0 에서 자계의 자속밀도는 0 이다
3. 두 영역 사이에 Current Sheet 가 존재할 때 Current Sheet 바로 위의 자계를 H_{z2} 바로 아래의 자계를 H_{z1} 이라 하면 H_{z2} = H_{z1} + J' 이다.

일반 영역 n에서의 지배방정식은 Maxwell 방정식으로 부터 변형 Bessel 방정식이 얻어지며 영역 d와 d+1 사이에 Current Sheet 가 놓여 있을 때 다음과 같은 Matrix 방정식을 얻을 수 있다[3].

$$\begin{bmatrix} B_{N-1} \\ H_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{N-1} \\ T_{N-2} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} T_{d+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_d \\ H_d + J' \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} B_d \\ H_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_d \\ T_{d-1} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} T_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ H_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

단, $\begin{bmatrix} T_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{na} & (1/\beta_n)T_{nb} \\ \beta_n T_{nc} & T_{nd} \end{bmatrix}$: 변환 Matrix

$$T_{na} = \frac{I_0(\gamma_n g_n) b_{n,n-1} - K_0(\gamma_n g_n) a_{n,n-1}}{I_0(\gamma_n g_{n-1}) b_{n,n-1} - K_0(\gamma_n g_{n-1}) a_{n,n-1}}$$

$$T_{nb} = \frac{-I_0(\gamma_n g_n) K_0(\gamma_n g_{n-1}) + K_0(\gamma_n g_n) I_0(\gamma_n g_{n-1})}{I_0(\gamma_n g_{n-1}) b_{n,n-1} - K_0(\gamma_n g_{n-1}) a_{n,n-1}}$$

$$T_{nc} = \frac{b_{n,n-1} a_{n,n} - a_{n,n-1} b_{n,n}}{I_0(\gamma_n g_{n-1}) b_{n,n-1} - K_0(\gamma_n g_{n-1}) a_{n,n-1}}$$

$$T_{nd} = \frac{d_{n,n} I_0(\gamma_n g_{n-1}) - C_{n,n} K_0(\gamma_n g_{n-1})}{I_0(\gamma_n g_{n-1}) b_{n,n-1} - K_0(\gamma_n g_{n-1}) a_{n,n-1}}$$

$$a_{n,n-1} = \frac{1}{\gamma_n r} I_0(\gamma_n g_{n-1}) + I_1(\gamma_n g_{n-1})$$

$$b_{n,n-1} = \frac{1}{\gamma_n r} K_0(\gamma_n g_{n-1}) - K_1(\gamma_n g_{n-1})$$

$$\gamma_n = (k^2 + j / q_n)^{1/2}$$

$$q_n = \rho_n / \mu_0 \mu_n \omega_n$$

여기서 I_n, K_n 은 n차 제1, 제2종 변형 Bessel 함수이다. 식 (1), (2)로 부터 각 영역의 경계 및 영역내의 자속밀도와 자계 분포를 구할 수 있다.

2. 복소페이를 이용한 공극영역 해석

해석을 위하여 TLIM의 1차 및 2차축의 권선배치를 그림 4와 같이 가정하고 편의상 2차축이 이동하는 것으로 가정한다.

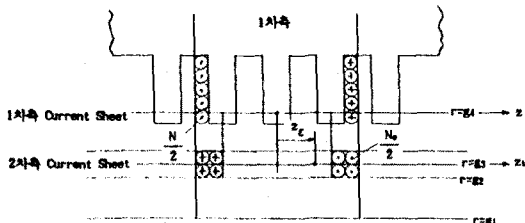


그림 4 극상당 1차축 권선과 2차축 권선의 기하학적 관계

따라서 3상권선의 슬롯전류밀도를 Fourier 급수로 전개하여 기본파만을 취하면, 복소 페이서[2][4]로 나타낸 Current Sheet 방정식을 얻을 수 있으며 앞에서 구한 변환 Matrix 를 이용하여 공극의 자속밀도를 구하면 다음과 같다.

$$B_{rs} = \mu_0 K_r s \frac{2N_s}{\pi W} \sin \frac{\pi}{4T} [\bar{I}_s^* e^{jNz_s/\tau} + \bar{I}_s e^{-jNz_s/\tau}] \quad (3)$$

단,
$$K_{rs} = \frac{[T_{sa} K_0(\gamma g_3) + K_0(\gamma g_4)] I_0(\gamma r)}{T_{sc} [I_0(\gamma g_4) K_0(\gamma g_2) - I_0(\gamma g_4) K_0(\gamma g_2)]} + \frac{[T_{sa} K_0(\gamma g_3) + K_0(\gamma g_4)] K_0(\gamma r)}{T_{sc} [I_0(\gamma g_4) K_0(\gamma g_2) - I_0(\gamma g_4) K_0(\gamma g_2)]}$$

$$\begin{bmatrix} T_{sa} & T_{sb}/\beta \\ \beta T_{sc} & T_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_4 \\ T_3 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

$$\beta = 1 / (j \mu_0)$$

$$\gamma = \pi / \tau$$

여기서 \bar{I}_s 와 \bar{I}_s^* 는 복소 페이서이다. 또한 2차축에 유기되는 와류에 의한 공극의 자속밀도를 구하면 다음과 같다.

$$B_{rt} = \mu_0 K_r t \frac{3N_t}{\pi} [\bar{I}_t^* e^{jNz_t/\tau} + \bar{I}_t e^{-jNz_t/\tau}] \quad (4)$$

$$K_{rt} = \frac{[T_{3a}(T_{4a}T_{4d} - T_{4c}T_{4b})K_0(\gamma g_3) - T_{4d}T_{3a}K_0(\gamma g_4)]I_0(\gamma r)}{(T_{3a}T_{4c} + T_{3c}T_{4d})[I_0(\gamma g_4)K_0(\gamma g_3) - I_0(\gamma g_3)K_0(\gamma g_4)]} + \frac{[T_{3a}(T_{4c}T_{4b} - T_{4a}T_{4d})I_0(\gamma g_3) - T_{4d}T_{3a}I_0(\gamma g_4)]K_0(\gamma r)}{(T_{3a}T_{4c} + T_{3c}T_{4d})[I_0(\gamma g_4)K_0(\gamma g_3) - I_0(\gamma g_3)K_0(\gamma g_4)]}$$

자기저항 및 기자력을 이용하여 공극자속밀도를 구하지 않고 변환 Matrix 를 이용하여 구한 식 (3)과 식 (4)를 이용하면 공극누설자속을 구할 수 있으므로 보다 정밀한 해석이 가능하다. 식 (3), (4)를 이용하여 1차축과 2차축에 대해 극간격당의 전체 쇄고자속을 구하면 다음과 같이 공극 인덕턴스들을 정의 할 수 있다.

$$L_{ss} = (3/\pi)\mu_0(2\pi g_4)N_s^2[K_{ws}^2 K_{rss}] \quad \text{1차축 자기인덕턴스}$$

$$M_{st} = (3/\pi)\mu_0(2\pi g_4)N_s^2[K_{ws} K_{wt} K_{rts}] \quad \text{1차축 상호인덕턴스}$$

$$L_{tt} = (3/\pi)\mu_0(2\pi g_3)N_t^2[K_{wt}^2 K_{ttt}] \quad \text{2차축 자기인덕턴스}$$

$$M_{ts} = (3/\pi)\mu_0(2\pi g_3)N_t^2[K_{wt} K_{ws} K_{rts}] \quad \text{2차축 상호인덕턴스}$$

단 $K_{rss} = K_{rs} \Big|_{r=g_4}$, $K_{rtt} = K_{rt} \Big|_{r=g_3}$
 $K_{rts} = K_{rt} \Big|_{r=g_4}$, $K_{rts} = K_{rs} \Big|_{r=g_3}$

1극당의 추력은 Lorentz 법칙으로 부터 다음과 같다[2].

$$F_z = \frac{2\pi}{3\tau} M_{ts} I_m [\bar{I}_s^* [\bar{I}_t e^{jNz_t/\tau}]^*] \quad (5)$$

또한 같은 방법으로 수직력도 구할 수 있으나 TLIM에서 공극이 일정한 경우 수직력은 축을 중심으로 대칭적으로 분포하여 상쇄되므로 여기서는 고려하지 않는다.

Acu를 권선 단면적이라 하면 1극 1상에 대한 1차저항 R_s 및 2차저항 R_t는 다음과 같다.

$$R_s = \rho_1 \pi (D + d_s) N / A_{cu} \quad (6)$$

$$R_t = 3\rho_2 (2\pi g_3) N_o^2 \frac{1}{\delta_2 \tau} \quad (7)$$

3. 동가회로 및 추력계산

정상상태에 있어서, 앞에서 구한 수식들로부터 다음 식들을 유도할 수 있으며, 이 식들로부터 1극1상에 대한 동가회로를 그림 5와 같이 구성할 수 있다.

$$\bar{U}_s = \bar{I}_s [R_1 + j\omega L_1] + [\bar{I}_s + \bar{I}_t] (j\omega L_m) \quad (8)$$

$$0 = \bar{I}_t [(R_2/\delta) + j\omega L_2] + [\bar{I}_s + \bar{I}_t] (j\omega L_m) \quad (9)$$

여기서, $R_1 = R_s$, $L_1 = L_{ss} - M_{st}$, $L_m = M_{st}$
 $R_2 = R_t M_{st} / M_{ts}$, $L_2 = L_{tt} M_{st} / M_{ts} - M_{st}$

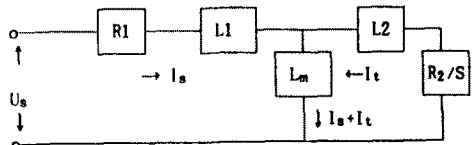


그림 7 TLIM의 단상 동가회로

동기회로상에서 전류 I_s 를 얻고 다음과 같이 동기회로 정수들로부터 추력 F_z 를 얻음으로써 공급전압에 대한 전류 및 추력 특성을 해석할 수 있다.

$$F_z = 3 \frac{\omega_1}{V_o} I_s^2 \frac{M_{ts}^2}{L_{tt}} \frac{G}{1+G} \quad (10)$$

여기서 $G = (\omega_1 S) T_t$ $T_t = L_{tt} / R_t$

이 식에서 G 는 TLIM의 'Goodness Factor'를 나타낸다.

III. TLIM 시작기 및 실험결과

본 연구에서는 LIM의 설계 이론에 따라 15인승(1000Kg), 중속(2 m/sec)용으로 시작기를 제작하였다. 시작기는 기존 엘리베이터 시스템의 Counter Weight 부분에 설치하기 위한 구조로 설계되었으며, 제작된 시작기의 제원은 표 1과 같다. 또한 그림 6은 실험적인 부하 모듈에 장착된 시작기의 모습을 나타낸다.

표 1 TLIM의 제원

TLIM 길이	1.07 [m]	공	극	7 [mm]
극 수	16	극	슬롯 피치	22.3 [mm]
1차축 내경	166 [mm]	슬롯 폭	슬롯 폭	15.3 [mm]
Back Iron 외경	152 [mm]	극상당 슬롯수	슬롯수	1
TLIM 외경	330 [mm]	2차도체 두께	두께	4 [mm]
극 간격	67 [mm]			

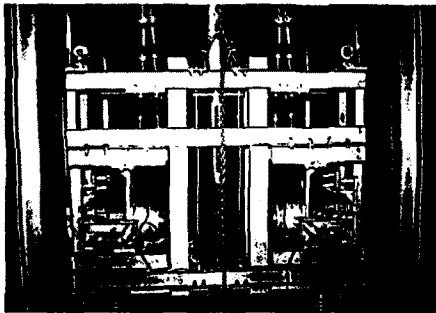
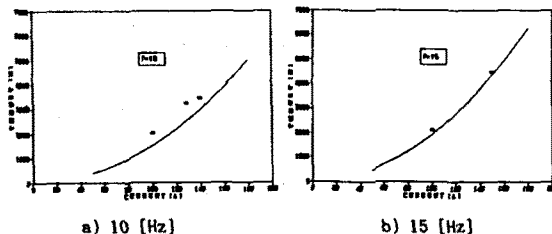


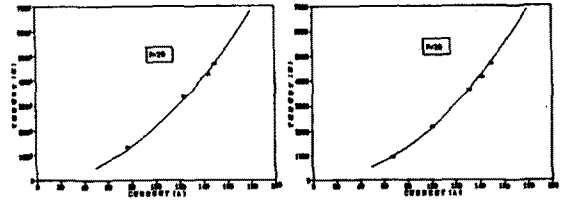
그림 6 실험 장치

엘리베이터의 경우 부하특성상 큰 기동추력이 요구되므로 기동추력특성이 설계상 매우 중요하다. 따라서 시작기의 기동추력을 측정하여 해석방법에 따른 계산치와 비교하여 정밀도를 알아보았다. 그림 7은 시작기를 구속한 상태에서 전류에 대한 기동추력을 각 전원주파수 (10[Hz]-35[Hz]) 별로 실험치와 계산치를 비교한 것이며, 그림 8은 일정 기동전류에서의 주파수에 대한 기동추력특성을 비교한 것이다.

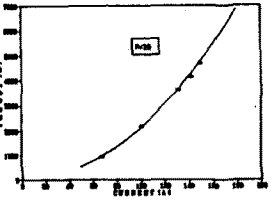


a) 10 [Hz]

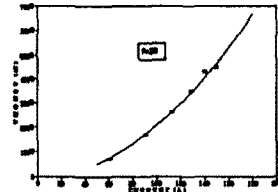
b) 15 [Hz]



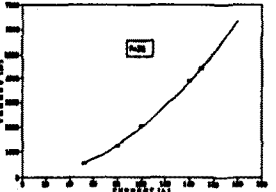
c) 20 [Hz]



d) 25 [Hz]



e) 30 [Hz]



f) 35 [Hz]

그림 7 TLIM 시작기의 전류-기동추력특성

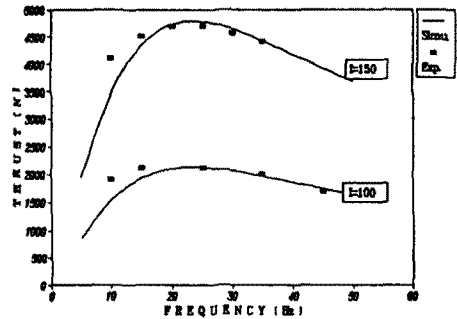


그림 8 TLIM 시작기의 일정전류 기동특성

그림 7과 그림 8의 결과로 볼 때 10[Hz]에서는 기동추력의 오차가 있으나 15[Hz] 이상에서는 실험치와 계산치가 근사함을 알 수 있다. 저주파수로 갈수록 실험치가 계산치 보다 크게 나타나는 것은 2차축 Back Iron의 자속 침투깊이가 커지면서 Back Iron의 와류에 의한 추력이 가산되는 것 때문이라고 생각된다. 따라서 운전주파수가 15[Hz] 이상인 경우에는 본 연구의 해석방법으로 매우 정밀한 해석이 가능함을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 Elevator용 TLIM의 개발을 위하여 대용량 TLIM의 특성해석방법을 제시하였고 또한 시작기 제작 및 시험을 통하여 정밀성을 입증하였다. 따라서 대용량 TLIM의 설계시 본 연구의 해석방법을 적용하면 특성예측이 가능하리라 판단된다.

참고 문헌

- (1) 'OTIS NEWS', 日本オース・エレベータ 株式会社, 平成元年3月
- (2) Ir. D. J. de Groot and Pro. C. J. Heuvelman 'Tubular linear induction motor for use as servo actuator', Proc. IEE, Vol. 137, Pt. B, No. 4, July, 1990
- (3) FREEMAN, E. M. 'Travelling waves in induction machines: input impedance and equivalent circuits' Proc. IEE, 1968, 115, (12), pp. 1772-1776
- (4) N. W. McLachlan 'BESSEL FUNCTION FOR ENGINEERS', OXFORD AT THE CLARENDON PRESS, 1955
- (5) LEONHARD W. 'Control of electric drives', (Springer - Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1985)