

Slotless Tubular type 선형 직류 전동기의 특성 해석

김병국, 조원영, 김태현, 조윤현

동아대학교

Characteristic Analysis of Tubular type Slotless Linear DC Motor

ByongKuk KIM, WonYoung JO, TaeHyun KIM, YunHyun CHO

Donga University

Abstract - This paper presents the characteristic analysis of slotless tubular type Linear DC Motor with Permanent Magnet excitation as variation of magnetic pole-pitch ratio. The stator armature winding of this motor is designed to wind at inner stator around the mover mounted with permanent magnet. First the practical model of this motor is made and its parameter is measured, after this simulation is carried out. Comparing the simulation results as variation of pole-pitch ratio, it can be seen that the reaching ability makes it useful in applications requiring a small, direct-drive actuator, which is required to extend into a specially constrained environment.

1. 서 론

최근 콤팩트서, 섬유기기, 초정밀 위치제어 등 고정도 위치 결정 제어를 필요로 하는 분야에서 서보 전동기의 수요가 급속히 증가하고 있다. 이러한 위치 결정 제어에 사용되는 서보 전동기 중에서도 동력 변환 장치 없이 직접 구동 방식으로 서보급 위치 제어 직선 운동을 하는 리니어 서보 전동기가 주목을 받고 있는 추세이다. 리니어 서보 전동기는 그 형상에 따라 크게 flat-plate type과 tubular type으로 나눌 수 있다. Tubular type은 flat-plate type의 문제점인 고정자와 이동자간의 자기 흡인력을 상쇄 시키는 구조를 가지고 있기 때문에 큰 가속 운동이 가능하다. 그리고 코킹 추력이 거의 없기 때문에 기동 시 필요한 전력 소비적 측면에서도 매우 효율적이다. 또 고정자의 전기자 권선은 이동자에 부착된 영구자석이 반경 방향으로 생성되는 자속과 쇄교 함으로써 작은 부피 및 적은 제조비용으로 단위 면적당 큰 힘을 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 slotless tubular type 리니어 직류 전동기에 대하여 공간 고조파에 의한 추력 발생 원리 및 특성식을 도출하고, 이에 대한 결과를 2D 및 3D 유한 요소법에 의해 비교 검토한다. 여기서는 자석의 극호비에 따른 특성을 살펴보고자 한다.

2. 추력 발생 원리

그림 1은 본 논문에서 해석하고자 하는 Tubular type 선형 직류 전동기의 형상을 보여준다. 이동자의 자석 내부의 철심은 back-iron의 역할과 동시에 전동기의 shaft 역할을 하고, 반경 방향 자화 영구 자석을 갖는 구조로 되어 있으므로 자속 경로를 정해준다. 고정자의 경우 3상 전기자 권선을 갖는 슬롯리스 구조로 되어 있으며, 3상 전기자 권선의 축방향 길이는 자석의 1극의 길이와 동일하다.

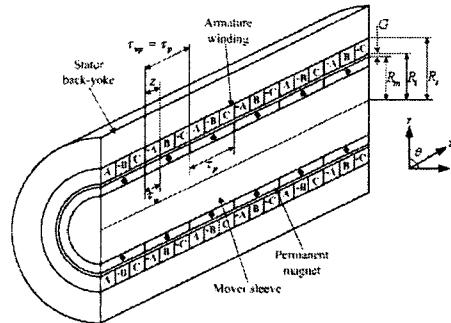


그림 1. Tubular type 선형 직류 전동기 형상

본 논문에서 논의할 대상인 tubular type 선형 직류 전동기의 세부 사양을 표 1에서 나타내었다. 전동기 사양은 서보 제어용으로 적용 가능하도록 속도 응답성과 추력에 주안점을 두었다.

표 1. Tubular type 선형 직류 전동기의 세부 사양

	Voltage	24[V]
Rated	Current	6[A]
	Speed	2[m/s]
	Thrust Force	40[N]
	Slot number	42
Stator	Material	S45C
	Length	540[mm]
	Pole number	6
Mover	Material	S45C
	Length	1000[mm]
	Turns/coil	40[turns]
Winding	Conductor Diameter	φ0.8[mm]
	B _r	1.1[T](20°)
Magnet	Material	NdFeB
	Coercivity	850[kA/m]
	Width	3[mm]
	Length	30[mm]
Air-gap		8[mm]
	Winding connection	Y-connection

2.1 상당 전기자 권선에 의한 추력

식 (1)은 상당 전기자 권선에 의한 추력 특성식이다.

$$F_{wp} = J \sum_{n=1}^{\infty} K_n \sin[m_n(z - \tau_{wp}/2)] \quad (1)$$

이 때

$$m_n = (2n-1)\pi/\tau_{wp}$$

$$K_n = -4\pi p \tau_w K_{dpn} K_m$$

여기서 p 는 극 쌍수, τ_p 는 극 피치, τ_w 는 극당 상당 고정자내 전기자 권선의 축방향 길이, K_{dpn} 은 $(2n-1)$ 차 고조파의 권선 계수이다. K_{dpn} 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$K_{dpn} = \frac{\sin(m_n \tau_w / 2)}{(m_n \tau_w / 2)} \times \sin(m_n \tau_{wp} / 2) \quad (2)$$

K_m 은 $(2n-1)$ 차 고조파의 반경 방향 성분에 기인하는 계수로써 다음과 같이 나타낸다.

$$K_m = \int_{R_i}^{R_s} r [a_{ln} BI_1(m_n r) + b_{ln} BK_1(m_n r)] dr \quad (3)$$

여기서 R_i 와 R_s 는 코일의 내경 및 외경, $BI_1(\cdot)$ 과 $BK_1(\cdot)$ 은 제 1종 및 제 2종 Bessel 함수이다. a_{ln} 과 b_{ln} 은 $(2n-1)$ 차 고조파에 의한 계수로 기기의 위상 및 영구 자석 물성치, 형상에 따른 파라메터 값과 밀접한 관계가 있다.

2.2 공간 고조파에 따른 특성식

3상 슬롯리스 tubular type 선형 전동기의 권선 배열은 그림 1과 같이 나타난다. 3상 권선은 하나의 극 간격과 동일한 길이로 배열되어 있고, 영구 자석은 반경 방향으로 자화되어 있다. 상당 권선수에 의한 전류 밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} J_A &= \sqrt{2} J_{rms} \cos \omega t \\ J_B &= \sqrt{2} J_{rms} \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ J_C &= \sqrt{2} J_{rms} \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (4)$$

이로부터 전체 추력은 식 (5)와 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} F &= F_A + F_B + F_C \\ &= \sqrt{2} J_{rms} \sum_{n=1}^{\infty} K_n \left[\sin m_n(z - \frac{\tau_p}{2}) \cos \omega t \right] \\ &\quad + \sin m_n(z - \frac{7\tau_p}{6}) \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ &\quad + \sin m_n(z + \frac{\tau_p}{6}) \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)는 식 (6)과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= F_1 + \sum_{n=3k+3}^{\infty} F_{n1} \cos \left[(2n-2)(\frac{\pi z}{\tau_p}) \right] \\ &\quad + \sum_{n=3k+3}^{\infty} F_{n3} \cos \left[(2n-5)(\frac{\pi z}{\tau_p}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 F_1 , F_{n1} , F_{n3} 는 다음과 같다.

$$F_1 = 12\sqrt{2} p \tau_p K_{rl} J_{rms} \sin(\pi/6) \quad (7)$$

$$F_{n1} = \sqrt{2} J_{rms} \frac{3}{2} K_n (-1)^k \quad n = 3k+1, k = 1, 2, \dots$$

$$F_{n3} = \sqrt{2} J_{rms} \frac{3}{2} K_n (-1)^{k+1} \quad n = 3k+3, k = 0, 1, 2, \dots$$

3. 해석 결과 및 토의

3.1 해석 모델

영구 자석의 극호비에 따른 특성을 알아보기 위해서 2D 및 3D 유한 요소법을 사용하였다. 공극의 요소는 해석의 정확성을 위해서 4층으로 분할하였으며, 추력 및 자기력 특성은 맥스웰 응력법을 적용하여 계산하였다. Tubular type 직선형 DC 전동기의 극호비가 1과 0.8일 때 전류를 각각 0, 5, 10[A]로 변화시키면서 특성을 비교해보았다. 실험에서는 2상 구동 방식을 이용한 제어기를 사용하였다.

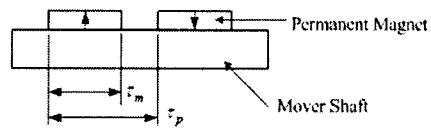


그림 2. 극호비(τ_m / τ_p)

3.2 결과 및 토의

그림 3과 그림 4는 극호비를 1과 0.8로 하였을 경우의 부하 특성에 따른 자속 밀도 분포 및 자속 선도를 나타낸다. 극호비가 1인 경우 인접한 극에 의한 누설 자속의 증가로 인해 공극 내 자속 밀도가 0.2T 정도로 매우 낮음을 알 수 있다. 이것은 slotless type에 따른 공극의 증가에 의한 영향으로 판단된다. 반대로 극호비가 0.8인 경우 인접한 극에 의한 누설 자속은 상대적으로 많이 감소하였기 때문에 공극 내 자속 밀도는 오히려 0.25T 정도로 증가함을 알 수 있다. 따라서 자석의 길이가 전동기 특성에 미치는 영향을 좀 더 정량적으로 알아보기 위하여 극호비에 따른 특성을 좀 더 알아보기로 한다.

그림 5와 그림 6에서는 극호비가 1과 0.8인 경우의 전류 및 속도, 역기전력, 추력의 특성 곡선을 나타내었다. 극호비가 1인 경우에는 자석의 길이가 상대적으로 길지만 누설 자속에 의한 낮은 공극 자속 밀도 때문에 추력이 상대적으로 작고, 속도도 1.62[m/s]로 극호비가 0.8인 경우의 1.82[m/s]보다 작음을 확인할 수 있었다. 따라서 정밀 위치 제어의 속도 속응성을 고려할 때 극호비가 0.8인 경우가 더 적당하다고 볼 수 있다. 그림 7은 극호비가 0.8인 경우의 이동자 중심부에서 고정자 외경까지 단면의 자속 밀도 분포를 나타낸다. 그림 7(a)와 (b)는 각각 자속 밀도의 x-성분과 y-성분을 나타낸다.



(a) 전류 0[A]인가 시



(b) 전류 5[A]인가 시



(c) 전류 10[A]인가 시
그림 3. 자속 분포도(극호비 1일 때)



(a) 전류 0[A]인가 시

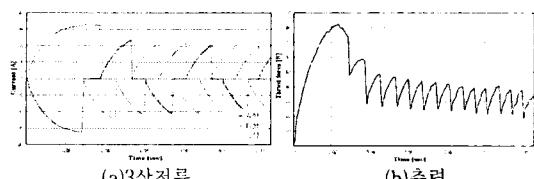


(b) 전류 5[A]인가 시



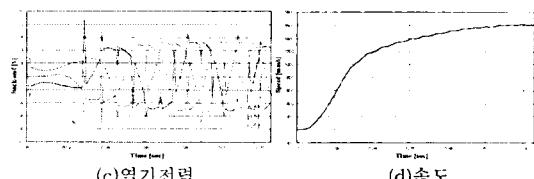
(c) 전류 10[A]인가 시

그림 4. 자속 분포도(극호비 1일 때)



(a) 3상전류

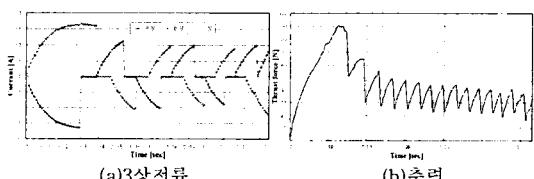
(b) 추력



(c) 역기전력

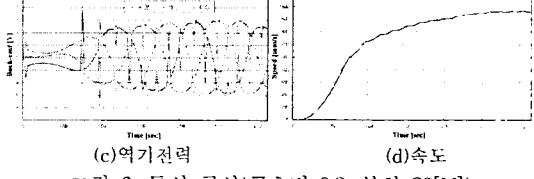
(d) 속도

그림 5. 특성 곡선(극호비 1, 부하 30[N])



(a) 3상전류

(b) 추력



(c) 역기전력

(d) 속도

그림 6. 특성 곡선(극호비 0.8, 부하 30[N])

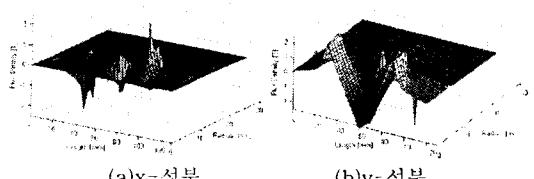


그림 8은 해석 결과를 바탕으로 한 tubular type 직선형 직류 전동기의 시작품의 형상과 구동 제어기를 나타낸다. 그림 9에서는 입력 전압이 구형파, 도통각 120° 입력에 따른 전류 당 추력의 시뮬레이션 결과 값과 제작을 통한 실제 모델의 추력을 비교한 것이다. 비교 결과 해석치와 결과치가 잘 일치함을 알 수 있다.

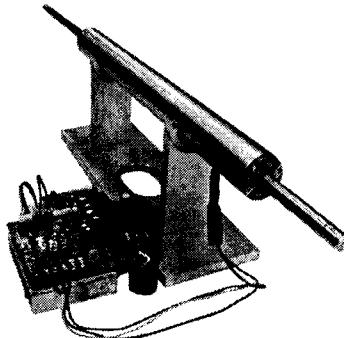


그림 8. Tubular type 전동기 시작품

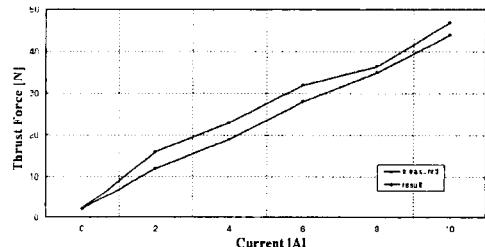


그림 9. 전류 당 추력 특성 비교

3. 결 론

본 논문에서는 slotless tubular type 선형 직류 전동기의 공간 고조파에 의한 추력 특성식을 도출하고, 이를 극호비와 전류의 변화에 따라 특성해석을 수행하였고, 실제작을 통한 실험과의 비교를 통하여 설계의 타당성을 검증하였다.

향후 tubular type 선형 직류 전동기의 센서리스 제어를 위한 구동 특성 및 정밀도 향상에 대한 연구가 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.Wang, G.W.Jewell, D.Howe, "Design optimization and comparison of tubular permanent magnet machine topologies", Iee Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 148, No. 5, September 2001
- [2] Analysis and implementation of a tubular motor with Halbach magnet array, Kim, W.-J.; Berhan, M.T.; Trumper, D.L.; Lang, J.H., Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE, Volume 1, 6-10 Oct. 1996 Page(s):471 - 478 vol.1
- [3] Analysis of the tubular motor with Halbach and radial magnet array, Seok Myeong Jang; Jang Young Choi; Sung Ho Lee; Sung Kook Cho; Won Bum Jang, Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference on, Volume 1, 9-11 Nov. 2003 Page(s):250 - 252 vol.1
- [4] M. G. Say, "Xtemafing Current Machines", London, Pitman Ltd., 1976. MEGA: A General 2D and 3D Finite Element Package for Electromagnetic Analysis, Applied Electromagnetic Research Centre, University