

원통형 리니어 BLDC 전동기의 동 특성 해석

김태현, 김병국, 활동원, 이인재, 조원영, 조윤현

동아대학교

Dynamic Characteristics Analysis of Tubular Type Linear BLDC Motor

Taehyun Kim, Byongkuk Kim, Dongwon Hwang, Injae Lee, Wonyung Jo, Yunhyun Cho
Dong-A University

Abstract – The demand for linear electrical machines, for both controlled motion and electrical power generation, has increased steadily in recent years. For example, for applications in the high-speed packaging and manufacturing sectors, linear electromagnetic machines, which provide thrust force directly to a payload without the need to convert rotary to linear motion, offer significant advantages in terms of simplicity, efficiency, positioning accuracy, and dynamic performance in both acceleration capability and bandwidth.

So, this paper describes analysis the dynamic characteristics of Tubular Type Linear BLDC Motor by simulation and experiments.

1. 서 론

최근 고속 고정도 위치 결정 제어를 필요로 하는 분야에서 서보 전동기의 수요가 증가하고 있다. 이러한 위치 결정 장치에 사용되는 서보 전동기로서 동력 변환 장치 없이 직선 운동을 직접 구동 방식에 의해 서보급 위치제어를 할 수 있는 리니어 서보 전동기가 주목을 받고 있는 추세이다.

원통형 리니어 BLDC 전동기는 flat-plate type의 문제점인 고정자와 이동자간의 자기 흡인력을 상쇄 시키는 구조를 가지고 있기 때문에 큰 가속 운동이 가능하다. 그리고 cogging 추력이 거의 없기 때문에 기동 시 필요한 전력 소비적 측면에서도 매우 효율적이다. 또한 고정자의 전기자 권선은 이동자에 부착된 영구자석이 방사형으로 생성하는 자속과 쇄교 함으로써 적은 제조비용으로 단위 면적당 큰 힘을 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 저 추력리플을 얻을 수 있으며, 직선왕복 운동을 직접 얻을 수 있는 구조의 원통형 리니어 BLDC 전동기에 대하여 논하였다. 짧은 구간의 최적의 직선 왕복 운동 알고리즘을 개발하기 위하여 먼저 원통형 BLDC 전동기를 설계, 제작하였으며, 최적의 운전 알고리즘을 개발하기 위하여 동 특성 해석을 하였다. 운전 중의 추력 리플 특성을 최소화하는 운전 모드를 얻기 위하여 기본 전압, 전류, 추력 등을 해석적 방법과 실험에 의한 방법으로 고찰, 비교하였다.

2. 해석 모델

2.1 원통형 리니어 BLDC 전동기의 구조

그림 1은 원통형 리니어 BLDC 전동기의 구조를 보여주고 있다. 고정자는 3상의 전기자 권선을 가지고 있는 형태로 되어있으며, 각 상은 $A - \bar{B} - C - \bar{A} - B - \bar{C}$ 의 순서로 연결되어 있어 3상의 전기자 권선 중 2상의 여자시

권선 기자력 방향과 영구 자석 자속의 방향은 서로 일치하므로 최대의 힘을 발생시킬 수 있는 구조를 가지고 있다.

일반적으로 전동기는 고정자에 권선을 부착하고 자속의 통로를 형성하는 고정자 철심이 있는 것이 보편적이지만 본 연구에서는 코어리스 방식을 채택함으로써 추력리플을 최소화할 수 있는 구조로 설계, 제작되었다. 그림 2는 본 연구에서 개발한 원통형 리니어 BLDC 전동기를 나타낸다.

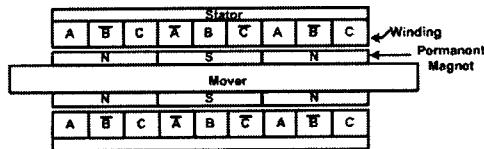


그림 1. 원통형 리니어 BLDC 전동기 model

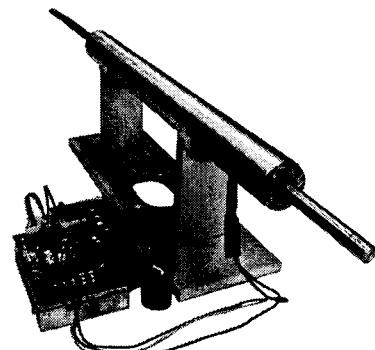


그림 2. 원통형 리니어 BLDC 전동기 및 드라이버

2.2 구동 회로

그림 3은 원통형 리니어 BLDC 전동기의 구동회로의 블록다이어그램을 나타낸다. 이동자의 위치를 검출하기 위해서 고정자에 3개의 홀센서를 각각 전기각 120° 의 간격을 두어 설치함으로서 이동자의 자극 위치를 검출할 수 있게 하였다. 이 자극 위치에 따라 마이크로컨트롤러에서는 프로그램된 시퀀스에 의해 게이트 신호를 전력소자에 인가하게 된다. 이에 따라 전력소자가 순차적으로 스위칭되어 고정자의 3상권선중 2상이 여자되는 구형과 2상 구동 방식이 구현된다.

본 구동회로에서는 ATMEL社의 범용 마이크로프로세서인 ATMEGA-8을 사용하였으며 스위칭을 위한 제어주기는 100[μ s]로 설정하였다.

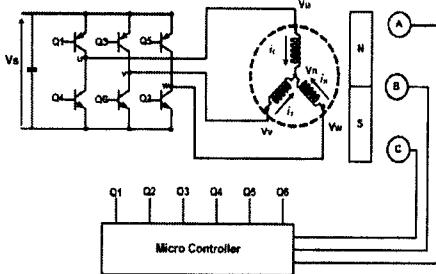


그림 3. 원통형 리니어 BLDC 구동 회로

3. 특성해석

2.1 수학적 모델링

원통형 리니어 BLDC 전동기의 과도상태에서의 동특성을 해석하기 위한 전압 방정식과 기계적 운동 방정식은 다음과 같다.

$$V = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + k_e v(t) \quad (1)$$

$$F = k_f i(t) = M \frac{dv(t)}{dt} + Dv(t) + F_l \quad (2)$$

여기서 k_f 는 주력 상수이고 M 은 가동자의 질량, D 는 마찰계수, F_l 은 부하를 나타낸다. 전압방정식을 구성하는 회로정수인 인덕턴스와 기전력 상수는 유한요소해석법으로 산정하였고, end coil 부분은 liwschitz에 의해 계산된 식을 사용하였으며 동특성 해석의 제원은 표 1에 나타내었다.

표 1 원통형 리니어 BLDC 전동기의 제원

Parameter	Value	Parameter	Value
저항	3[Ω]	극 간격	30[mm]
극 수	6	공극	8[mm]
턴 수	40[turn]	권선 굽기	0.8[θ]
이동자의 질량	1.5[Kg]	영구자석 자석밀도	1.1[T]

과도상태에서 전류는 속도의 함수가 된다. 즉 속도 기전력 및 변압기 기전력에 따라 전류가 변하게 되며 발생 추력도 변화한다. 속도에 대한 미분방정식의 해를 구해서 전류 및 전류의 변화로부터 속도 및 가속도 추력 특성을 해석한다.

전압방정식과 기계적 운동방정식으로부터 전류의 순시치에 대한 수식은 식 3과 같으며 운동 방정식은 식 4와 같다.

$$I = \frac{M}{k_f} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{D}{k_f} v(t) + \frac{F_l}{k_f} \quad (3)$$

$$\frac{LM}{k_f} \frac{d^2v(t)}{dt^2} + \left[\frac{LD}{k_f} + \frac{MR}{k_f} \right] \frac{dv(t)}{dt} \quad (4)$$

$$+ \left[\frac{RD}{k_f} + k_e \right] v(t) + \frac{F_l R}{k_f} - V(t) = 0$$

식 4의 일반해는 다음과 같으며,

$$v(t) = v_c(t) + v_p(t) \quad (5)$$

$$- \left(\frac{D}{M} + \frac{R}{L} \right) + \sqrt{\left(\frac{D}{M} + \frac{R}{L} \right)^2 - 4 \left(\frac{DR}{LM} + \frac{k_f k_e}{LM} \right)}$$

$$v_c(t) = C_1 e^{- \left(\frac{D}{M} + \frac{R}{L} \right) t} + C_2 e^{- \left(\frac{D}{M} + \frac{R}{L} \right) t} \quad (6)$$

$$- \left(\frac{D}{M} + \frac{R}{L} \right) - \sqrt{\left(\frac{D}{M} + \frac{R}{L} \right)^2 - 4 \left(\frac{DR}{LM} + \frac{k_f k_e}{LM} \right)} + C_2 e^{- \left(\frac{D}{M} + \frac{R}{L} \right) t}$$

$v_p(t) = c$, $\dot{v}_p(t) = 0$, $\ddot{v}_p(t) = 0$ 으로부터 $v_p(t)$ 는

$$v_p(t) = \frac{k_f V - F_l R}{DR + k_f k_e} \quad (7)$$

이 수식에 초기속도가 0 이라는 초기조건으로부터 미정계수를 결정하면 시간에 따른 속도 방정식은 다음과 같다.

$$A = \frac{F_l R - K_f V}{DR + K_f K_e}$$

$$B = \sqrt{C^2 - 4A}$$

$$C = - \left(\frac{D}{m} + \frac{R}{L} \right) \text{ 일 때}$$

$$m_1 = \frac{-C + \sqrt{C^2 - 4A}}{2} \quad (8)$$

$$m_2 = \frac{-C - \sqrt{C^2 - 4A}}{2}$$

$$v(t) = \frac{m_2/m_1}{(m_2/m_1 - 1)} A e^{m_1 t} + \frac{1}{(1 - m_2/m_1)} A e^{m_2 t} - A \quad (9)$$

4. 실험 결과 및 검토

그림 4는 기동시 A상의 전압 파형을 나타낸다. 인가 전압은 5[V]이며, 구형파 2상 구동방식으로 동작한다.

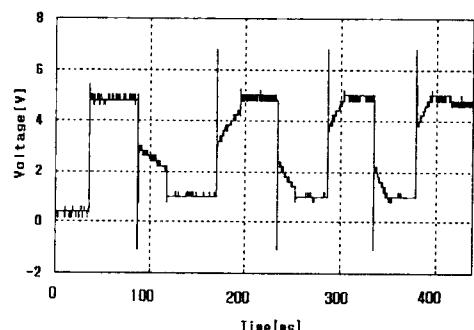


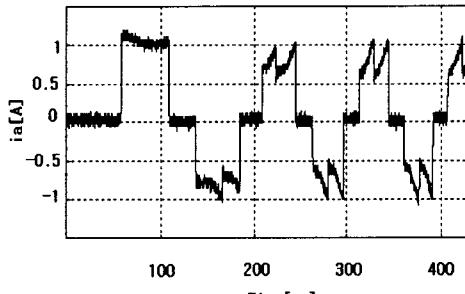
그림 4. 기동시 상전압(A상)

그림 5는 무부하시의 각상에 흐르는 전류 파형을 나타낸다. 무부하시의 입력 전류의 최대치는 약 1[A]가 흐름을 알 수 있다. 그림 6과 그림 7은 무부하 기동시의 속

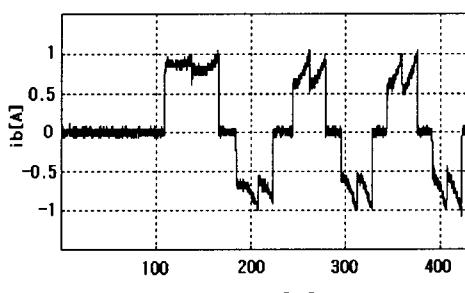
도 및 추력 특성 곡선을 나타낸다. 그림 6에서 전압 인가시 정상상태 도달 속도는 시뮬레이션과 실험에 의한 결과가 각각 $0.47[m/s]$ 와 $0.45[m/s]$ 이고 정상상태까지의 도달 시간은 $250[ms]$ 로서 시뮬레이션과 실험결과 모두 충분한 가속력을 가지는 것을 알 수 있다.

그림 7에서 원통형 리니어 BLDC 전동기의 전압 인가시 시간에 따른 추력 특성을 나타낸다. 추력 특성곡선에서도 알 수 있다시피 과도 상태에서도 추력 리플이 발생하며, 정상상태에 도달하면서 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 코어리스 고정자 구조의 경우에서도 운전방식과 영구자석의 구조형상에 따라 추력 리플이 발생함을 알 수 있다. 향후 추력 리플을 최소화하는 제어알고리즘 개발과 기동 특성을 최적화하는 연구가 필요할 것이다.



(a) A상 기동전류



(b) B상 기동전류

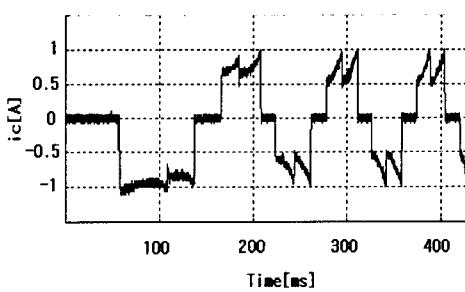


그림 5. 기동시 각상의 전류

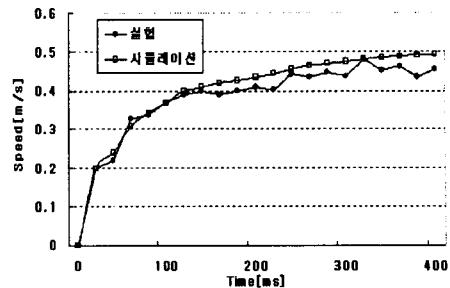


그림 6. 기동시 속도

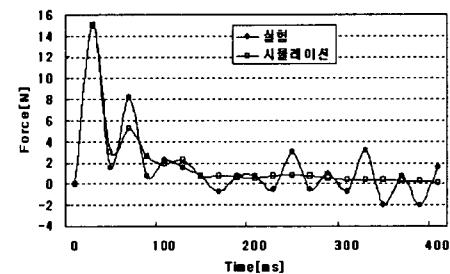


그림 7. 기동시 추력

3. 결 론

본 연구에서는 코어리스 원통형 리니어 BLDC 전동기의 동특성 해석에 대하여 논의하였다. 본 논문에서는 기본적인 상태방정식을 가지고 유한 요소법을 이용한 원통형 리니어 BLDC 전동기의 동특성을 해석하고 실제 제작과 구동에 의한 실험치와 비교한바 두 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. L. Cathey, D. A. Topmiller, S. A. Nasar, "X tubular self-synchronous motor for artificial heart pump drive", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. BME33, No. 3, pp. 315-319, 1986.
- [2] R. Akmese, J. F. Eastham, "Dynamic perform of a brushless dc tubular drive system", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, No 5,
- [3] Zhu Z.Q., Hor P.J., Howe D., Rees-Jones J., 1997, "Calculation of Cogging Force in a Novel Slotted Linear Tubular Brushless Permanent Magnet Motor", Proc. Intermag97, New Orleans. USA, Paper No. BC-07.
- [4] Eastham J.F., Akmese R., Lai H.C., 1990, "Optimum design of brushless tubular linear machines", IEEE Trans. Magnetics, 26, 2547-2549.
- [5] A. Basak and G. H. Shirkoohi, "Computation of magnetic field in DC brushless linear motors with NdFeB magnets," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, no. 2, pp. 948-951, March 1990.