

부하 상태에 따른 선형 BLDC 전동기의 동특성 해석 및 실험적 고찰

조원영, 김병국, 김태현, 황동원, 정근석, 조운현, 이권순  
 동아대학교

Dynamic Characteristic Analysis and Experimental Investigation of Linear BLDC Motor according to Load Condition

WonYoung Jo, ByongKuk Kim, TaeHyun Kim, DongWon Hwang, KunSeek Jung, YunHyun Cho, KwonSoon Lee

**Abstract** - This paper presents the dynamic characteristics of a linear brushless DC (BLDC) motor with permanent magnet excitation for the precision conveyor according to the load condition. In order to investigate the accurate dynamic performance of the linear BLDC motor driving with 6 step inverter-fed, finite element techniques coupling with external circuit models, together with the simultaneous simulation of motion of the mover system, are proposed. The results of finite element analysis are compared to the experimental ones.

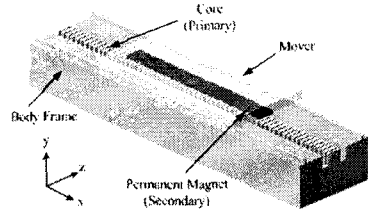
1. 서 론

최근 작업물을 이송하기 위한 반송 시스템으로 기존의 회전형 모터와 팬 벨트를 이용하는 대신 리니어 모터를 이용한 반송 시스템이 개발되어 실용화되고 있다. 리니어모터를 사용할 경우 회전운동을 직선운동으로 변환시키기 위한 기계적인 장치가 생략됨에 따라 손실, 소음, 진동이 적으며 특히 먼지 등이 발생되지 않는 장점이 있다. 이와 같은 리니어모터의 장점 때문에 국, 내외에서 리니어모터를 이용한 자동반송장치의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이에 전기기기의 자기회로 해석에서 공간과 시간에 따른 전동기의 상태변수 변화와 이들 간의 상호작용에 의한 전동기 과도특성 및 정, 동특성에 대한 해석은 전동기의 설계 및 특성해석에 필수적이다.[1-2] 이런 전기기기의 특성 개선을 위한 과도특성 해석 기법에 관한 연구가 활발해지고 있다. 근래에는 컴퓨터 처리 속도의 발달로 인한 전자계 해석방법이 많이 사용되고 있으며, 과도특성해석을 위해 유한 요소법과 전기 및 기계계의 운동 방정식을 이용한 외부 회로 모델을 결합하여 과도특성을 해석하는 연구들이 보고되고 있다.[3] 본 논문에서는 재질의 비선형성과 구동 회로를 고려할 수 있는 외부 회로 모델링을 유한 요소법과 결합하여 동특성 해석을 수행하였다. 동특성 해석을 수행하기 위한 구동 방식은 2상 여자 구형과 전압이며, 전압방정식과 기계계의 운동 방정식을 결합하여 과도 상태 해석을 수행함으로써 정상상태에 수렴 시까지의 시간에 따른 전류, 속도, 추력 등의 제반 물리량의 추이를 보였다. 또한 정·동특성 해석 결과의 타당성을 실험 결과와 비교하여 검증하였다.

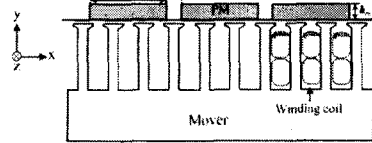
2. 해석 모델 및 기본 이론

2.1 해석 모델

해석 대상인 영구자석형 선형 BLDC 전동기의 구조는 그림 1과 같이 영구자석을 가진 이동자와 전기자 권선이 삽입된 형태의 고정자를 가지며, 주요 사양은 표 1에 나타내었다. 해석 대상 전동기의 전원 회로 결선도는 그림 2과 같이 Y결선이고, 구동 방식은 3상 2여자 방식이다.



(a) 선형 BLDC 전동기의 3차원 구조



(b) 단면도  
 그림 1. 해석 모델

2.2 외부 회로 모델링

인버터 구동용 선형 BLDC 전동기 시스템을 모델링하는 일반적인 방법은 그림 2와 같은 아날로그 회로를 유한 요소 전자계 해석에 결합을 시킨다. 각 파라미터는 부하 상태에 따라 변하며, 해석 과정에 다시 입력 변수로 작용하게 된다. 식 (1)은 유한 요소 해석의 지배 방정식을 나타낸다. 동특성 해석에 적용한 회로 방정식과 운동 방정식은 식 (2), 식 (3)과 같으며, 해석 시 입력 전압은 2상 구동으로 여자하였으며, 부하량에 따라 운동 방정식에 부하 ( $F_L$ )을 설정하였다.

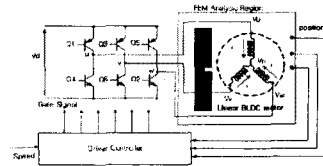


그림 2 선형 BLDC 전동기의 외부 구동 회로

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\vec{J}_o - \vec{J}_m \quad (1)$$

$$V_i = IR + L \frac{di}{dt} + E_i \quad (2)$$

$$F_e = ma + k\mu + F_L \quad (3)$$

여기서,  $A$  자기 벡터 포텐셜,  $\vec{J}_o$ : 1차측 권선의 전류

밀도,  $\vec{J}_m$ : 영구자석의 등가자화 전류밀도,  $\mu$ : 투자율,  $I_f$ : 상 전류 [A],  $V_f$ : 상 전압 [V],  $R$ : 저항 [ $\Omega$ ],  $L$ : 인덕턴스 [H],  $F_c$ : 발생 추력 [N],  $m$ : 이동자의 질량 [Kg],  $a$ : 가속도 [ $m/s^2$ ],  $k_f$ : 손실계수,  $v$ : 이동자 속도 [ $m/s$ ],  $F_L$ : 부하 [N]이다.

표 1 선형 BLDC 전동기 시작기의 사양

Rated	Voltage	60[V]
	Speed	0.4[m/s]
	Thrust force	400[N]
Stator (Primary)	Pole pitch	60[mm]
	Slot pitch	20[mm]
	Slot width	13[mm]
	Slot/pole/phase	3
	Core Laminated length	55[mm]
Mover (Secondary, PM)	Turns per phase	200[turns]
	Height	10[mm]
	Width	50[mm]
Material	Rare earth	Nd-Fe-B
	Residual induction	1.25[T]
	Mechanical air-gap	10[mm]

### 3. 해석 결과 및 비교

#### 3.1 해석 결과

그림 3은 무부하 상태와 부하 상태(1000[N])일 때의 선형 BLDC 전동기의 정·동특성을 보여준다. 그림 3의 (a), (b)는 부하 상태에 따른 입력 전류 파형이며, (c)와 (d)는 부하상태에 따른 속도 곡선 및 추력 곡선을 나타낸다. 이 결과로부터 속도 rising time은 부하상태에 따라 많은 차이가 나타남을 알 수 있다. 무부하 상태인 경우 기동시 입력 전류는 약 0.22[A]정도이며, 0.25[sec]만에 정상 상태 속도인 420[mm/s]까지 도달하지만, 부하시에는 정상상태 도달까지 시간은 0.6[sec]정도로 나타남을 알 수 있다. 추력 특성은 부하량에 따라 평균 추력의 크기는 증가함을 알 수 있다.

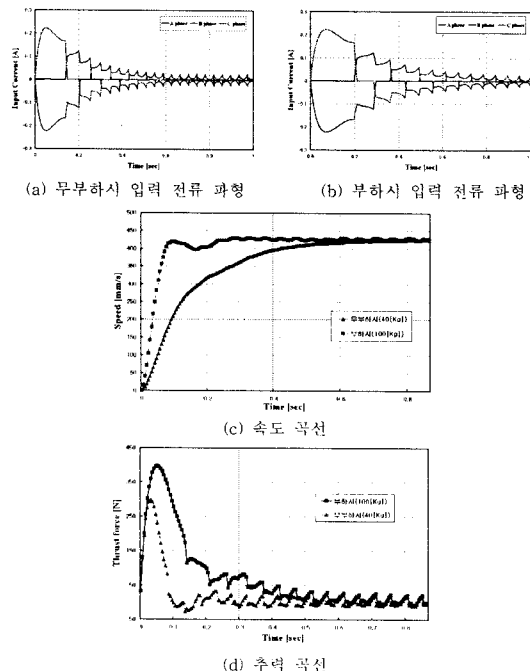


그림 3 무부하 및 부하(1000[N]) 상태일 때의 정·동특성

그림 4와 그림 5는 기동시 및 정상 속도 운전시의 부하 상태에 따른 변위 및 자속 분포를 나타낸 것이다. 최초 시작점을 같이 하였을 경우 같은 시간 동안의 부하 상태에 따른 이동 변위는 각각 달리 나타남을 알 수 있다.

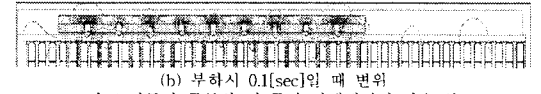
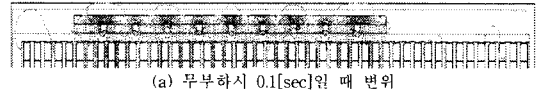


그림 4 기동시 무부하 및 부하 상태에서의 자속 분포

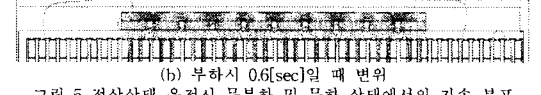
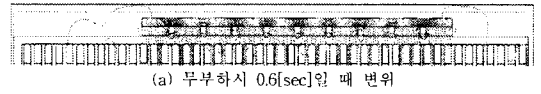


그림 5 정상상태 운전시 무부하 및 부하 상태에서의 자속 분포

#### 3.2 실험 결과 비교 및 검토

그림 6은 본 논문에서 제시된 선형 BLDC 전동기의 시작기 및 특성 실험 장비를 보여준다. 특성 테스트 시에 입력 전압은 PWM 인버터를 이용한 3상-2여자 방식을 사용하였고, 이동자의 위치는 홀소자를 이용하여 신호 검출을 하였다.

그림 7과 그림 8은 각 부하 상태에 따른 손실계수 50 일 때의 동특성 해석결과를 나타낸 것이다. 그림 7과 그림 8의 (a)와 (b)는 각각 정격 전압 60[V]에서 무부하상태에 시간에 따른 각상의 입력 전류와 각 입력 전압에 대한 역기전력 특성을 나타낸 것이다. 전류 파형이 왜곡을 가지는 것은 코일에서의 자속 밀도 분포가 정현파에 가까운 양상을 가지기 때문이며, 역기전력은 속도가 정상상태에 도달하기 전까지 증가하는 양상이 나타남을 알 수 있다. (c)와 (d)는 부하 상태 변화에 따라 시간의 변화에 따른 이동자에서 발생하는 추력과 속도의 추이를 비교한 것이다.

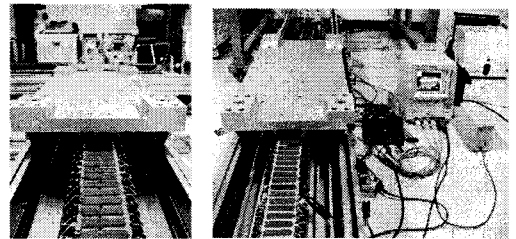
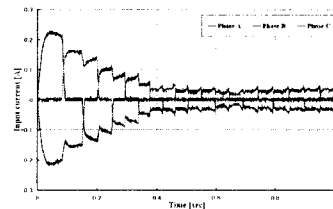
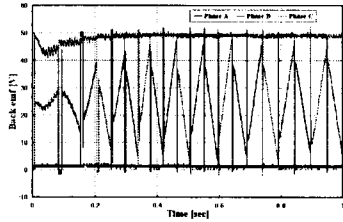
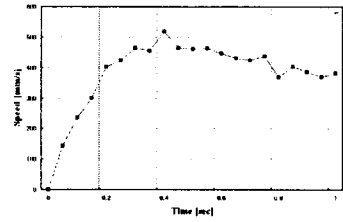


그림 6 선형 BLDC 전동기의 시작기 및 실험장치

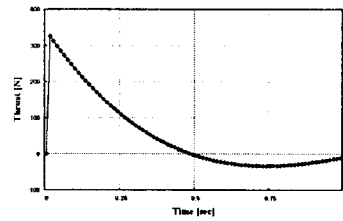




(b) 입력 전압 60[V]일 때의 역기전력

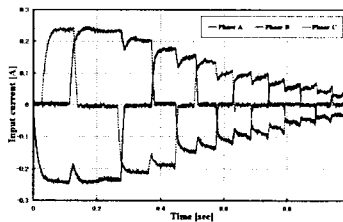


(c) 속도 곡선

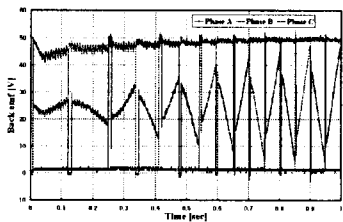


(d) 추력 곡선

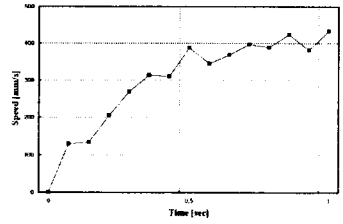
그림 7 무부하시 동특성



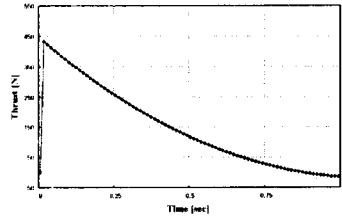
(a) 각 상의 입력 전류



(b) 입력 전압 60[V]일 때의 역기전력



(c) 속도 곡선



(d) 추력 곡선  
그림 8 부하시 동특성

#### 4. 결 론

본 논문에서는 유한 요소법과 외부 회로 모델을 결합한 방법을 이용하여 영구 자석형 선형 BLDC 전동기의 부하 상태에 따른 동특성 해석을 수행하였고, 이를 실험치와 비교함으로써 타당성을 검증하였다. 영구 자석형 선형 전동기는 큰 유효공극으로 인해 비교적 큰 누설 자속과 횡방향 자속을 발생하므로 이를 효율적으로 반영한 동특성 해석을 수행하였다. 정특성에서 해석결과와 평균 추력은 390[N]으로 실험치의 평균 추력 396[N]과 비교했을 때 오차가 거의 없는 정밀한 해석이 가능함을 알 수 있었다. 정격 전압과 최대 입력 전압에 따른 동특성 해석으로부터 부하 상태별 시간에 따른 각상의 전류와 역기전력의 변화와 정상상태 도달하기까지의 이동자가 받는 추력 및 속도의 변화 추이를 보였다. 따라서, 본 해석 모델에서 이동자의 동적 이동을 고려한 운동 방정식과 전기계의 전압 방정식을 유한 요소법과 외부 회로 모델을 결합하여 동특성 해석을 수행하여 제반 특성을 분석할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술부(MOST)의 국가지정연구실 사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Boldea and S.A. Nasar, "Linear Electrical actuators and Generators", Cambridge, U.K.: Cambridge Univ.Press, 1997.
- [2] H. Polinder, J.G. Sloopweg, M.J.Hoeijmakers, J.C. Compter, " Modeling of a Linear PM Machine Including Magnet saturation and End Effects: Maximum Force-to-Current ratio", IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol.39, No.6, pp.1681-1688, Nov./Dec, 2003.
- [3] J. Hur, S. B. Yoon, D. Y. Hwang and D. S. Hyun, "Analysis of PMLSM Using Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network Method", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, no. 5, pp. 4143-4134, 1997.
- [4] J.S.Moghani, J.F.Eastham, R.Akmese, and R.J.Hill-Conttingham, "Three Dimensional Force Prediction in a Model Linear Brushless DC Motor", IEEE Tran. on Magn., vol. 30, pp. 4752-4754, Nov. 1994.
- [5] K.K.Tan, S.N.Huang, and T.H.Lee, "Roust adaptive Numerical compensation for Friction and Force Ripple in Permanent-Magnet Linear Motors", IEEE Trans. Vol. 38, No.1, January 2002.