

부하 가변에 따른 리니어 모터의 동특성 해석

이 승 훈\*, 정 수 권, 김 규 탁  
 창원대학교 전기공학과

The Dynamic Characteristic Analysis of PMLSM according to Variable Load

Seung-Hoon Lee\*, Su-Kwon Jeong, Gyu-Tak Kim  
 Department of Electrical Engineering, Changwon National Univ.

**Abstract** - In this paper, the dynamic characteristic according to variable load of Permanent magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM) is dealt with carefully. And the experiment machine is manufactured for analysis of dynamic characteristic. The results of both simulation and experiment are discussed.

1. 서 론

최근, 자동화 설비와 공작기기 등의 고성능화를 위해서 구동 시스템인 리니어 모터의 고기능화는 물론 정밀 위치제어 성능이 동시에 요구되고 있다. 대부분의 리니어 시스템은 회전형 전동기를 구동원으로 채택하고 있으나, 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 기계적 메커니즘에서 발생하는 여러 문제점으로 인해 고속 성능과 정밀 위치제어성을 만족시키지 못하고 있어 회전-직선 변환 메커니즘 없이 직접 직선 추력을 발생시키는 선형 전동기(Linear motor)에 관심이 고조 되고 있다. 종래의 리니어 모터에 관한 연구는 리니어 모터의 구조적인 변화에 의한 추력, 디텐트력 감소 등의 특성 연구가 많이 이루어져 왔으나 모터가 산업 시스템에 적용되어 생산 공정 중에 받게 되는 부하의 변화에 대한 동특성 해석은 매우 미비한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 리니어 모터가 생산 설비에 적용 되어 공정 수행 시의 동특성 해석을 위해 전기적인 전압 방정식과 기계적 운동 방정식을 결합하여 상태 방정식을 도출하고 Matlab Simulink를 이용하여 모델링을 수행하였다. 즉, 리니어 모터가 실 사업계에 적용시, 리니어 모터에 인가되는 다양한 부하를 가정하여 리니어 모터의 운전특성을 해석 하였다. 또한 리니어 모터의 동특성을 해석하기 위한 실제 실험 장치를 제작하고 운전 중인 리니어 모터에 부하를 인가하는 실험을 통해 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교·검토 하였다.

2. 모델링 및 시뮬레이션

Matlab을 통한 시뮬레이션을 하기 위해서는 인덕턴스에 의한 역기전력을 고려한 전압방정식과 기계적 운동 방정식을 통한 수학적 모델링이 선행되어야 한다.

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

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

여기서,

$K_e$ : 역기전력상수,  $K_f$ : 추력상수

$v(t)$ : 속도,  $\frac{dv}{dt}$ : 가속도

$M$ : 이송부하,  $D$ : 마찰계수,  $F_l$ : 부하

(1) 식과 (2) 식에서 시간에 대한 전류 방정식은 다음과 같이 나타난다.

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

(3) 식으로부터 전류를 구할 수 있고, 전류변화량으로부터 (1) 식을 사용하여 시간에 대한 속도방정식을 구하면 (4) 식과 같다.

$$v(t) = \frac{D}{(D-1)} A e^{m_1 t} + \frac{1}{(1-D)} A e^{m_2 t} - A \quad (4)$$

여기서,

$$A = \frac{k_f R - k_f V}{DR + k_f k_e}, B = \frac{DR}{LM} + \frac{k_f k_e}{LM}, C = \frac{D}{M} + \frac{R}{L}, D = \frac{m_2}{m_1}$$

$$m_1 = \frac{-C + \sqrt{C^2 - 4B}}{2}, m_2 = \frac{-C - \sqrt{C^2 - 4B}}{2}$$

위의 특성식을 사용하여 설계목표인 속도 2m/s와 가속도 2G를 얻기 위해 산정한 파라미터값은 표 1에 나타내었으며, 그림 1은 Simulink를 이용하여 구성한 리니어 모터 시스템이다.

표 1. 동특성 해석 파라메터

항 목	값 [단위]	항 목	값 [단위]
정격전류	6.53 [Arms]	역기전력 상수(Ke)	34.4 [Vrms/m/s]
정격추력	647.6 [N]	추력 상수(Kf)	99.1 [N/Arms]
최대전류	19.60 [Arms]	마찰계수(D)	0.1
최대추력	1942.7 [N]	이송부하(M)	40 [Kg]
상저항(R)	1.4 [Ohm]	인덕턴스(L)	17.7 [mH]

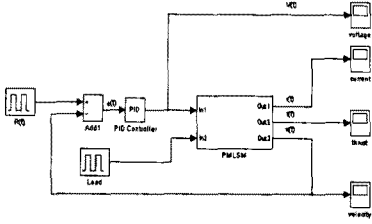


그림 1. 리니어 모터 시스템의 모델링

리니어 모터가 속도 제어를 통해 가속도 2G로 2(m/s)의 속도를 낼 수 있게 PI 값을 조정하고, 임펄스 부하가 인가되는 시스템을 구현하였다. 실제 제작한 동특성 실험기기에서는 가동자의 이동거리가 한정되어 있기 때문에 실험 결과와의 동등한 비교를 위해 이동 거리는 700(mm)로 하여 특성해석을 하였다.

부하의 조건은 크기 500(N), 지속시간 0.01(sec)로 하고 시뮬레이션 한 결과 그림 2,3과 같은 속도와 전류 그리고 추력 특성을 도출하였다.

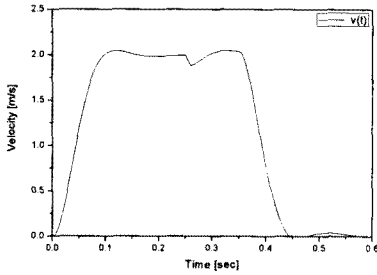


그림 2. 부하에 따른 속도 특성

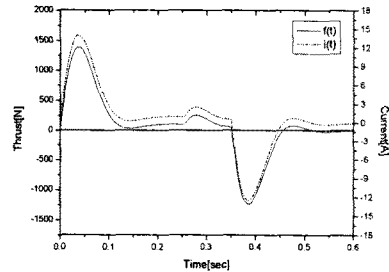


그림 3. 부하에 따른 전류 및 추력 특성

그림 2에서는 0.1(sec)에 2(m/s)로 수렴하여 가속도 2G로 운전하는 것을 확인할 수 있고, 0.25(sec)에 부하가 걸려 속도가 감소하였다가 다시 2(m/s)로 수렴하는 특성을 확인할 수 있었다. 그림 3에서는 부하가 걸리는 시점에서 전류가 증가하고, 전류가 증가함에 따라 추력 또한 증가하는 특성을 확인할 수 있다.

동일한 부하 지속시간(0.01(sec))에 부하의 크기를 달리 하였을 때 부하의 크기에 따른 속도, 전류 및 추력 특성을 그림 4,5,6에 각각 나타내었다.

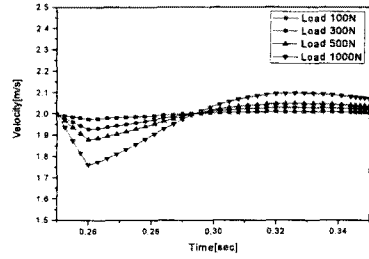


그림 4. 부하크기에 따른 속도

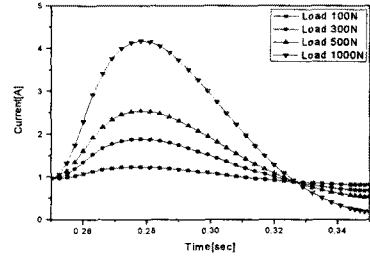


그림 5. 부하크기에 따른 전류

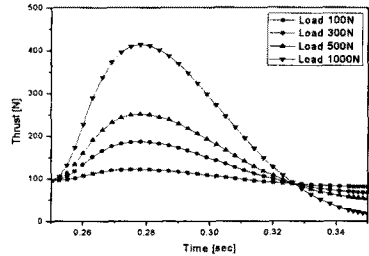
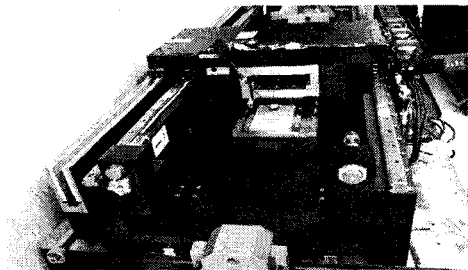


그림 6. 부하크기에 따른 추력

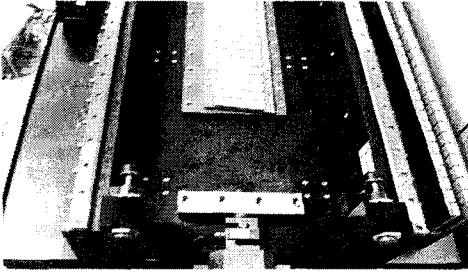
그림 4,5,6에서 알 수 있듯이 부하의 크기가 클수록 속도가 감소하였다가 목표 속도로 수렴하기 위해 많은 전류가 흘러 발생하는 추력 또한 커지게 되고 증가한 전류에 비례하여 속도가 증가하여 목표 속도에 수렴한다.

### 3. 리니어 모터의 동특성 실험

PMLSM의 동특성을 측정하기 위한 시험기를 그림 7에 나타내었다.



(a) 동추력 측정 시스템



(b) 로드셀 장착  
그림 7. 동특성 측정 시스템

리니어 모터의 발생 추력은 로드셀을 이용하여 측정한다. 이 때 이동자를 로드셀로 고정시킨 후 발생하는 힘을 측정하므로 정지시의 추력만 측정하게 된다. 따라서, 로드셀의 위치를 조금씩 이동시키면서 발생 추력을 측정하여 정추력을 실측하게 되므로 엄밀한 의미에서의 이동시의 추력이라고 말할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 PMLSM의 Stator를 슬라이딩베드 위에 고정시켰다. 이때 슬라이딩 베드는 LM 가이드 위에 장착되어 있어 마찰력을 최소화시킴은 물론 이동이 가능하도록 하였다. 이 슬라이딩 베드를 로드셀로 고정시킴으로서 PMLSM의 mover가 이동시에도 작용, 반작용 법칙을 이용 PMLSM의 stator에 가해지는 moving 추력을 실측할 수 있도록 하였다. 한편, mover의 속도는 리니어 스케일 1.0[m]로 실측하였다. 또한 동특성 측정 시스템에 별도의 양축식 리니어 모터를 설치하여 부하로서 사용하도록 하였으며 이를 이용 역기전력 상수도 측정할 수 있도록 하였다.

실험 조건은 시뮬레이션과 동일하게 2G의 가속도로 2[m/s]의 속력을 내며 총 이동거리 700[mm]로 운전하게 하였다. 그리고 임펄스 부하의 조건도 시뮬레이션과 동일하게 크기 500[N], 지속시간 0.01[sec]로 하고 실험 하였고, 부하의 지속시간은 동일하게 하고, 크기만 가변하여 크기에 따른 특성 변화를 비교하였다.

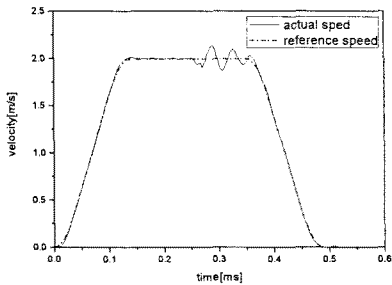


그림 8. 부하에 따른 속도 특성

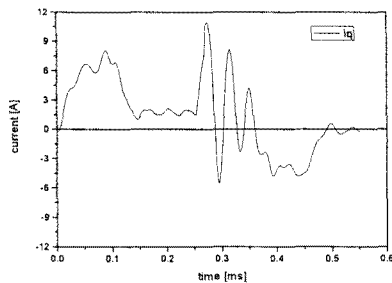


그림 9. 부하에 따른 전류 특성

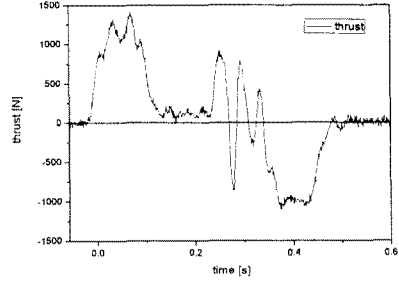


그림 10. 부하에 따른 추력 특성

그림 8,9,10에서 실제 모터 구동시 목표 속도에 도달하는 시간이 시뮬레이션보다 많이 걸리고, 속도, 전류 및 추력의 오버슈트가 많이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 기동 시에 걸리는 전류의 최대값이 시뮬레이션 값보다 작지만 전류가 들어가는 시간이 더 긴 것을 확인할 수 있었다. 또한 부하가 걸리는 시점에서의 속도의 감소는 시뮬레이션 값과 거의 같지만 목표속도로 수렴하는 과정에서 전류와 추력은 오버슈트가 많이 발생하였다. 이는 부하의 지속 시간이 아주 짧아 제어가 부하의 변화를 따라가지 못하였기 때문이다. 즉, 실제 모터의 제어가 시뮬레이션의 제어보다 잘 이루어지지 않았고, 이론적인 모델링과 실제 모터의 특성이 완전히 일치하지 않기 때문이라고 사료된다.

부하의 크기를 가변한 실험결과를 시뮬레이션 결과와 비교해 보면 실제 모터에서 부하가 클수록 속도의 감소와 전류 및 추력의 크기가 증가하는 양상이 비슷하다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 실제 모터에서는 부하가 클수록 목표 속도에 수렴하는 시간이 더 많이 걸리는 것을 확인할 수 있었는데 이는 시뮬레이션상의 이상적인 제어와 실제 제어의 차이라고 할 수 있다. 실험 결과 그림은 지면 관계상 생략하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 부하가변에 따른 리니어 모터의 동특성을 시뮬레이션 결과와 동특성 실험장비를 사용하여 측정한 실험 결과를 비교하여 해석하였다. 정상상태로 운전 중인 리니어 모터에 임펄스 부하를 인가하였을 때 속도, 전류 및 추력의 변화를 시뮬레이션 결과와 비교하였는데 그 양상은 비슷하였지만 실제 모터의 구동 시에는 시뮬레이션과 같은 이상적인 제어가 어렵기 때문에 부하의 크기가 클수록 오버슈트가 많이 발생하고, 제어 목표값에 도달하는 시간이 길어짐을 확인할 수 있었다. 따라서 실제 모터의 특성에 가까운 모델링과 더욱 안정적인 제어기의 연구와 더욱 다양한 부하조건에 따른 동특성 연구가 지속되어야 할 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 김규탁 외 "공심 코일형 리니어 DC 모터의 설계 및 동특성 해석", 대한 전기 학회 논문지 pp.165~171, 49B권, 3호 2000
- [2] 김규탁 외 "영구자석 선형동기전동기의 특성해석 및 위치 제어 시스템 구성", 대한 전기 학회 춘계 학술대회 논문집 pp.93~95, 2001