

부하형태에 따른 LSM의 부하 모델링 및 기동특성 해석

이동엽, 한광규, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

Load modeling and dynamic characteristic analysis
 of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

Dong-Yeup Lee, Kwang-Kyu Han, Gyu-Tak Kim
 Chang-won Univ

Abstract - This paper presents dynamic characteristic of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM). In order to analyze dynamic characteristics, simulink of Matlab is used. The measuring system of dynamic characteristics is manufactured and experiment results are compared with simulation results.

을 그대로 적용할 수 있다.

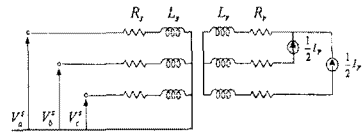


그림 1. PMLSM의 등가회로

1. 서 론

산업기술의 고도화에 따라 자동화 시스템 등의 생산 설비 및 공작기 등 고속화 및 고정밀화에 대한 요구는 날로 증가하고 있다. 직선 운동을 필요로 하는 시스템에서는 회전기의 회전운동을 기계적인 메커니즘을 이용해 선형운동으로 변환 하는데, 기계적 메커니즘 단계에서 발생하는 진동, 소음, 마찰, 지연성 등으로 인하여 정밀, 고속 운동을 요구하는 시스템에는 부합되지 않으므로, 에너지 변환메커니즘이 없이 직접 직선 추력을 발생하는 리니어 모터에 관심이 고조 되어 많은 연구가 이루어지고 있다.

리니어 모터의 효율적 운전과 제어특성을 향상시키기 위해서는 기기의 특성예측을 위한 수학적 모델링과 정확한 기동특성의 해석이 요구 되고 있다. 그러나, 현재까지의 리니어 모터 연구에서는 기기의 효율 증대와 같은 모터 자체의 특성 향상에 대한 연구는 많이 이루어 지고 있으나 가, 감속 운전과 같은 동특성에 대한 연구는 많이 이루어지지 않고 있다. 즉, 추력 측정도 로드셀에 의하여 정지시의 정추력을 측정하는 것이 전부일 정도로 동특성 연구는 매우 미흡한 실정이다. 이는 운전 중에 직선운동을 측정할 수 있는 시스템의 구성이 매우 어렵기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 리니어 모터의 동특성을 측정하기 위한 시스템을 구성하였다. 리니어 모터의 동특성 해석은 매트랩 프로그램의 시뮬레이션을 사용하였다. 지금까지의 연구들에서는 시뮬레이션을 통한 해석만이 주로 이루어 졌으나 본 연구에서는 실제 리니어 모터의 가, 감속 운동을 비롯한 동특성을 실험할 수 있는 시험기를 제작하여 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 연구의 타당성을 입증 하였다.

2. PMLSM의 모델링

2.1 PMLSM의 수학적 모델

동기전동기는 계자가 직류 전원에 의해 여자되는 전자석형과 영구자석으로 자속을 만드는 영구자석형 동기기로 크게 나눌 수 있다. 영구자석형 동기기는 전자석형 동기기와 여자 방식만 다를 뿐 근본적인 제어 및 구동원리는 같다. 또한, 직선운동을 구현하는 선형 동기전동기(PMLSM)도 회전형 전동기와 수학적 모델링은 동일하므로 기존의 회전형 동기기의 제어 이론 및 모델링 기법

일반적인 전압방정식과 운동방정식은 다음과 같다

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

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

여기서,

K_e : 역기전력상수, K_f : 추력상수
 M : 이송부하, D : 마찰계수, F_l : 부하

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

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

식(3) 으로부터 전류를 구할 수 있고, 전류변화량으로부터 식(1) 을 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,

$$A = \frac{k_f R - k_f V}{DR + k_f k_e}, \quad B = \frac{DR}{LM} + \frac{k_f k_e}{LM},$$

$$C = \frac{D}{M} + \frac{R}{L}, \quad D = \frac{m_2}{m_1}$$

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

이러한 기본적인 수학적 모델링을 사용하여 PMLSM의 기동 특성 및 과도특성을 해석할 수 있다

2.2 시뮬레이션 및 결과

연속적인 운전의 제어 시스템 설계에 있어서 가장 널리 쓰이고 있는 제어방식은 PID제어 방식이다. 미분제어는 잘 활용하면 안정도에 기여하고, 예측기능이 있어 응답속도를 빠르게 할 수 있다는 장점이 있지만, 시스템에 잡음성분이 있을 때 미분 값이 커지게 되어 제어입력에 나쁜 영향을 미치는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 PI제어방식을 사용한다. 그림 2는 오차신호에 의해 동작하는 연속치계 PI제어의 블록도이다.

시뮬레이션을 위한 설계 파라메타는 2G의 가속력으로 2m/s의 속도를 가지는 운동을 하도록 설계하였다. 그림 2와 같이 매트랩 프로그램의 시뮬링크를 이용하여 식 (3)과 식 (4)를 전달 함수로 하는 PMLSM PLANT를 구성하고 속도 및 위치제어를 위해 출력 속도를 피드백하는 PI제어기를 구성하였다. 이때의 각 회로정수는 표 1과 같다.

표 1. 회로정수

가속도[G]	2	속도[m/s]	2
추력상수[N/A]	99.1	역기전력상수 [V·s/m]	34.4
저항[Ω]	1.4	인덕턴스[mH]	17.7
가동자 무게[kg]	40	마찰계수	0.1
병렬회로수	2	최대부하[N]	1,000

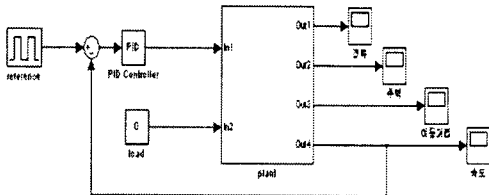
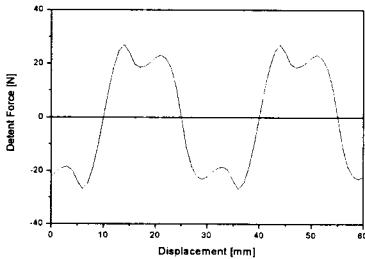
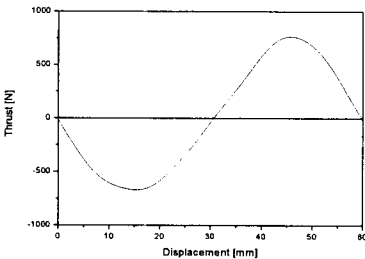


그림 2. 시뮬링크 모델링



(a) 디텐트력



(b) 정추력

그림 3. 회로정수 산출을 위한 FEA 결과

이때 제어를 위한 추력 및 역기전력 상수, 인덕턴스는 유한요소 해석을 통하여 계산하였으며, 이를 그림 3에

나타내었다. 그림 3 (b)의 정추력 계산시의 입력전류는 6.5[A]이므로 이때의 발생 추력의 최대치는 717.3[N]으로 계산되었다. 따라서, 본 시험기의 자속은 영구자석에 의하여 발생하므로 전기자 전류는 모두 q축 전류로 작용하게 된다. 따라서, 추력상수는 110.3[N/A]이다. 그러나, 2차원 유한요소해석의 추력값은 영구자석의 길이방향으로의 누설자속 등을 고려할 수 없으므로 실제의 추력은 이보다 작게 된다. 또한, 시험기의 마찰 등을 고려하면 추력상수는 이보다 작게 되어 99.1[N/A]로 설정하였다.

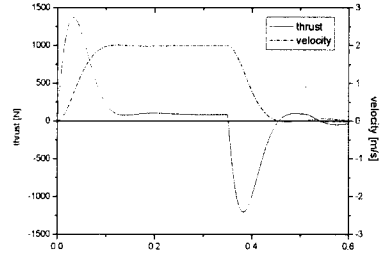


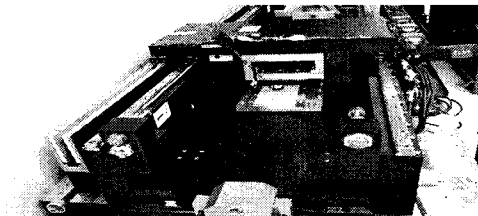
그림 4. 가. 감속 특성 계산

그림 4는 PI제어기를 이용한 가, 감속 특성 계산 결과이다. 가속구간의 기동추력의 최대치는 1370[N]으로 나타났으며, 지연시간 없이 정상속도에 잘 수렴함을 알 수 있다. 정상속도에서의 추력은 마찰력을 고려하였기 때문에 등속구간에서도 추력이 0가 아님을 알 수 있다. 가, 감속시 속도의 오버슈트는 0.81[%]로 지령속도에 잘 수렴함을 알 수 있다.

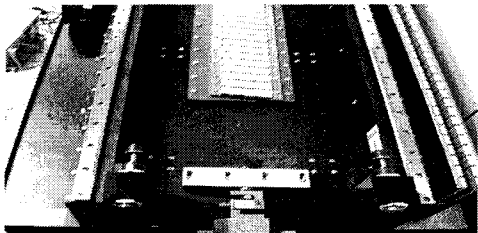
3. PMLSM의 동특성 측정 시스템

3.1 실험장비

PMLSM의 동특성을 측정하기 위한 시험기를 그림 5에 나타내었다.



(a) 동추력 측정 시스템



(b) 로드셀 장착

그림 5. 동특성 측정 시스템

리니어 모터의 발생 추력은 로드셀을 이용하여 측정한다. 이때 이동자를 로드셀로 고정시킨 후 발생하는 힘을 측정하므로 정지시의 추력만 측정하게 된다. 따라서, 로드셀의 위치를 조금씩 이동시키면서 발생 추력을 측정하

여 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 최소화 시키는 물론 이동이 가능하도록 하였다. 이 슬라이딩 베드를 로드셀(model:SBA-200L CAS)로 고정시키므로써 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 양속식 리니어 모터를 설치하여 부하로서 사용하도록 하였으며 이를 이용 역기전력 상수도 측정할 수 있도록 하였으며, 1[m/s]로 이동시의 전기자 코일의 역기전력 파형을 그림 6에 나타내었다. 발생전압의 피크치는 46.5[V]로 실측되었다. 따라서, 역기전력 상수는 32.9[V · s/m]로 실측되었으며 이론치 34.4[V · s/m]가 일치하는 만족스러운 결과를 얻었다.

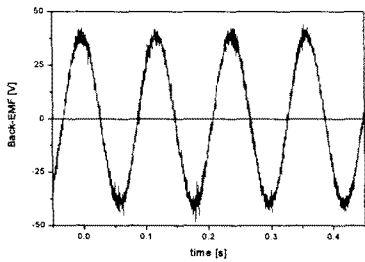
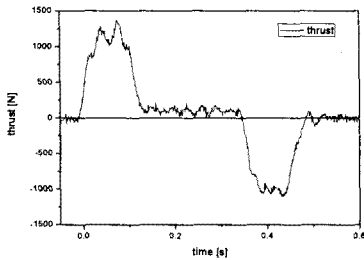
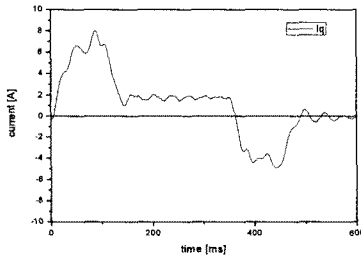


그림 6. 역기전력 파형

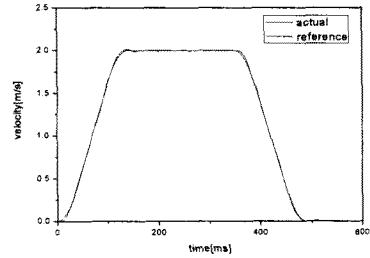
3.2 실험 결과



(a) 추력



(b) 전류(Iq)



(c) 속도

그림 7. 시험 결과

그림 7 (a)는 실측한 추력이다. 여기서 가동시 실제 운전 특성의 추력의 최대치는 1,378(N)으로 시뮬레이션에서의 추력 1370.4(N)과 거의 일치하는 크기를 나타내었다. 그러나, 감속시에는 실측치는 1103(N)으로 계산치 1207(N)보다 다소 작게 나타났다. 이는 mover의 관성력에 기인하는 것으로 사료된다. 한편 그림 (b)의 전류 특성에서 알 수 있는바와 같이 전류 양상이 발생 토크 양상과 동일함으로써 일반적인 Iq 제어 이론의 타당성을 입증할 수 있었다. 그림 (c)는 PMLSM 제어 특성으로서 지령속도와 실제 추종속도를 나타낸 것으로 리니어 스케일을 이용하여 실측하였다.

실제 PMLSM의 제어시에는 안정적인 운전을 위하여 S-curve 속도제어를 하게 된다. 이때 운전 속도가 지령 속도에 응답하지 못할때에는 토크전류가 크게 증가되고 그에 따라서 추력 또한 크게 발생하므로 지령속도를 초과하게 되며 이를 보상하기 위하여 전류를 줄여 추력을 제어하게 된다. 따라서, 그림 7의 발생추력은 그림 4의 시뮬레이션 추력과 비교하여 리플이 많이 발생하게 되었으며 가속구간에서의 속도의 지령치 및 추종치, 이때의 발생추력을 동시에 나타낸 그림 8을 통하여 확인할 수 있다.

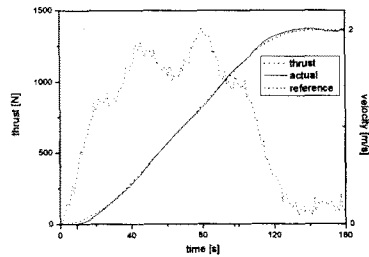


그림 8. 가속시 추력의 리플과 속도 S-curve

4. 결 론

본 논문에서는 PMLSM의 동특성을 연구하였다. 실험치에서는 안정된 제어를 위해 S 커브 곡선을 사용한 관계로 속도 피드백 시 많은 추력 리플이 발생하게 되었다. 또한, 시뮬레이션에서는 고려할 수 없었던 가동자의 관성과 디텐트력, 마찰력 등으로 인해 운전 특성과 다소 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이에 대한 연구는 차후 과제로 삼겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김규탁 외, "연구자석 선형동기전동기의 특성해석 및 위치 제어 시스템 구성", 대한전기학회 춘계학술논문집, p93~95, 2001.