

스프링 유무에 따른 가동자식형 직선형 액추에이터의 동특성해석 및 실험

장석명*, 최장영*, 유대준*, 조한욱*, 박지훈*, 이성호**

*충남대학교, **LG D/A 연구소

Dynamic Analysis and Experiments of Moving Magnet Linear Actuator with/without Spring

Seok-Myeong Jang*, Jang-Young Choi*, Dae-Joon You*, Han-Wook Cho*, Ji-Hoon Park*, Sung-Ho Lee**

Abstract - This paper deals with the dynamic analysis and experiments of moving-magnet linear actuator with/without spring. On the basis of two dimensional (2-D) analytical solutions and experiments, control parameters are obtained. And then, dynamic simulation algorithm is established from the voltage and motion equation. Finally, for various values of frequency, dynamic simulation results for characteristics of voltage, current and displacement of moving-magnet linear actuator are presented and confirmed through the experiments. In particular, This paper makes the PWM voltage waveform using a DSP for bidirectional voltage drive

1. 서 론

영구자석 기기들은 산업자동화, 사무자동화 그리고 로봇 산업과 같은 분야에서 직선운동을 위한 용도로 쓰임이 늘어가는 추세이다. 실제로, 이러한 영구자석 직선형 모터들은 속도제어, 추력제어, 정밀위치제어, 무게 그리고 효율측면에서 많은 장점을 갖고 있다. 게다가 직선형 구동시스템에서 리니어 모터를 이용하는 경우 스크류, 체인, 기어시스템 등의 기계적 에너지 변환장치가 필요하지 않아 부품수와 공간이 적어도 되며 에너지 손실이나 소음을 발생하지 않고 운전속도에서도 제한을 받지 않는다는 장점을 갖고 있다. 특히 원통형 액추에이터는 평면형 액추에이터에 비해 단부 효과 및 영구자석 이용률 측면에서 유리한 점을 갖는다 [1]. 한편, 직선형 액추에이터는 스프링을 가짐으로써 가동자 질량과 스프링의 탄성 계수에 의해 결정되어지는 공진주파수에서의 운전이 가능해지므로 공진을 적절히 이용한다면 스프링을 갖지 않는 모델에 비하여 동적특성에서 유리한 면을 갖을 것으로 사료된다.

따라서 본 논문에서는 LOA로 구동되는 시스템의 전류 및 변위와 같은 동적 특성에 스프링이 미치는 영향에 대하여 알아보기로 한다. 우선, 양방향 구동을 위한 양방향 전압을 액추에이터에 공급하기 위하여 DSP를 이용한 단상 PWM 전압 과정을 실험을 통하여 구현하고 시뮬레이션을 위하여 역시 MATHWORK 사의 SIMULLINK를 통하여서도 구현하였다. 또한, 공간고조파법으로 도출된 특성식 및 실험으로부터 추력 상수, 역기전력 상수, 저항 및 인덕턴스와 같은 제어정수를 도출하고, 전압방정식 및 운동방정식으로부터 시뮬레이션 알고리즘을 도출하였다. 도출된 시뮬레이션 알고리즘으로부터 스프링의 유무에 따른 가동자식형 직선형 액추에이터의 전류 및 변위특성을 다양한 주파수에 따라 알아보고, 시뮬레이션 결과는 실험결과와의 비교를 통하여 타당성을 검증하기로 한다.

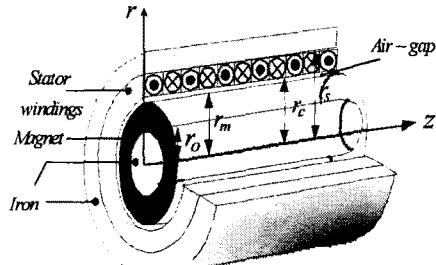


그림 1. 가동자식형 왕복 액추에이터 구조

2. 가동자식형 왕복 액추에이터의 구조

그림 1은 본 논문에서 다루고자하는 가동자식형 왕복 액추에이터의 구조를 보여준다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 기하학적인 구조는 원통형으로 영구자석의 이용률이 매우 높은 구조로 되어 있으며 가동자 영구자석의 배열은 Halbach 배열이 사용되었고, 코일은 단상권선을 사용하였다.

3. 제어정수 도출

제어 정수를 도출하는데 있어서 본 논문은 해석적 방법 및 실험적 방법을 사용하여 도출하였다. 그 결과는 표 1에 보이며, 해석 값 및 실험값은 잘 일치함이 보여진다.

표 1 원통형 Halbach 배열 영구자석을 갖는 가동자식형 LOA 의 제 정수

항목	해석 값	실험 값
추력 상수: K_T [N/A]	48	48
역기전력 상수: K_E [V.sec/m]	48	46
코일 저항: R [Ω]	6	6
코일 인덕턴스 L [mH]	3	2.8
가동체 질량: M [Kg]	3.8	
스프링 상수: k [N/m]	2200	

3.1 해석적 방법

우리는 이미 [2]에서 원통형 Halbach 배열을 갖는 직선형 왕복 액추에이터의 특성해석을 수행함으로써 자체, 쇄교자속, 역기전력 및 추력 특성식을 도출하였다. 따라서 본 논문에서는 도출된 특성식으로부터 등가회로 제어정수를 도출하고자 한다. 영구자석 및 고정자 권선에 의한 쇄교자속은 [2]에 주어진 쇄교자속 특성식 및 자속밀도로부터 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_{pm} = \frac{8N_p \pi r_p [A'_n I_n(k_n r) + B'_n K_n(k_n r)] \sin(k_n z)}{n\pi} \quad (1.a)$$

$$\lambda_j = \sum_{n=1, odd}^{\infty} \frac{32\gamma_n \mu_0 r_s N_p^2 i_s p}{nk_n \tau^2} [-I_1(k_n r_s) + \beta_n K_1(k_n r_s)] \sin(k_n z) \quad (1.b)$$

여기서 p 는 극 쌍 수, i_s 는 상당 전류이고, N_p 및 μ_0 는 각각 상당 턴 수 및 공기의 투자율이다. $k_n = n\pi/\tau$ 로 주어지는 n 차의 공간 고조파를 나타낸다. I_1 및 K_1 은 각각 수정된 1차 1종 및 2종 배셀함수를 나타낸다. 한편 제안된 액추에이터의 힘은 영구자석에 의한 자계와 고정자권선의 전류밀도와의 상호작용 즉 Lorentz력으로부터 구할 수 있는데, 앞에서 언급했듯이 고정자권선의 전류밀도를 면전류 밀도라 가정하였으므로 체적적분이 아닌 면적적분을 사용하여 추력 특성식을 식 (2)와 같이 유도할 수 있다.

$$F_z = \sum_{n=1, odd}^{\infty} -8N_p \pi r_s p [A'_n I_1(k_n r_s) + B'_n K_1(k_n r_s)] \cos(k_n z) / \tau \quad (2)$$

역기전력 $e = v \cdot d\lambda_{PM}/dz = vK_E$ 이므로 식 (1.a)로부터 역기전력 상수는 식 (3)으로 주어진다.

$$K_E = \sum_{n=1, odd}^{\infty} 8N_p \pi r_s p [A'_n I_1(k_n r_s) + B'_n K_1(k_n r_s)] / \tau \quad (3)$$

추력 $F_z = K_E i_s$ 이므로 식 (2)에 의해 추력상수는 식 (4)로 주어진다.

$$K_T = \sum_{n=1, odd}^{\infty} -8N_p \pi r_s p [A'_n I_1(k_n r_s) + B'_n K_1(k_n r_s)] / \tau \quad (4)$$

인덕턴스 $L = \lambda_j/i_s$ 이므로 식 (1.b)로부터 인덕턴스는 식 (5)로 주어진다.

$$L = \sum_{n=1, odd}^{\infty} \frac{32\gamma_n \mu_0 r_s N_p^2 p}{nk_n \tau^2} [-I_1(k_n r_s) + \beta_n K_1(k_n r_s)] \quad (5)$$

가동자석형 직선형 액추에이터의 경우 저주파수 운전을 하므로 AC 코일 저항은 DC 코일 저항과 동일하다고 가정 할 수 있기 때문에 고정자권선의 저항은 식 (6)으로 주어진다.

$$R = 4\rho_c N_l l_c / \pi d_c^2 \quad (6)$$

여기서 d_c 는 코일의 직경, l_c 는 코일 한 턴의 길이이다.

3.2 실험적 방법

그림 2 (a) 및 (b)는 각각 정 추력 및 역기전력에 대한 해석적 결과와 실험적 결과와의 비교를 보여준다. 해석결과와 실험결과는 매우 잘 일치함이 보여진다. 특히 우리는 두 대의 액추에이터를 제작하였기에 한대는 전동기로 다른 하나는 발전기로 구동함으로써 속도에 따른 역기전력 값을 얻을 수 있었다.

4. 시뮬레이션 알고리즘

스프링을 갖는 가동자석형 LOA 시스템의 기계적인 운동방정식은 식 (7)과 같다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = K_r i - kx - C_d \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

여기서 M 과 K_r 는 각각 가동자의 질량 및 추력상수이며 k , C_d 와 dx/dt 는 각각 탄성계수, 마찰계수 및 가동자 속도이다. 한편, 전압방정식은 식 (8)과 같다.

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + K_E \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

여기서 e 와 i 는 각각 전원 전압 및 LOA에 흐르는 전류이고 R , L 및 K_E 는 각각 코일의 저항, 인덕턴스 및 역기전력 상수를 나타낸다. 한편 식 (7)과 식 (8)로부터 상태변수가 변위와 전류인 상태방정식 및 출력방정식을 얻을 수 있으며, 이 방정식으로부터 그림 3으로 주어지는 시뮬레이션 알고리즘을 얻을 수 있다.

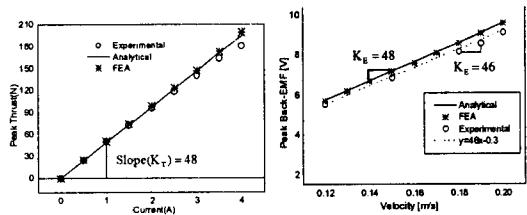


그림 2. 해석적, 유한요소 해석 및 실험 결과 사이의 비교 : (a) 정추력 실험 및 (b) 역기전력 특성 실험

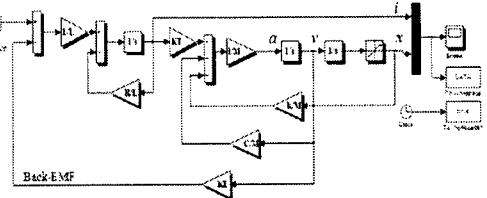


그림 3. 동특성 시뮬레이션을 위한 블록 다이아그램.

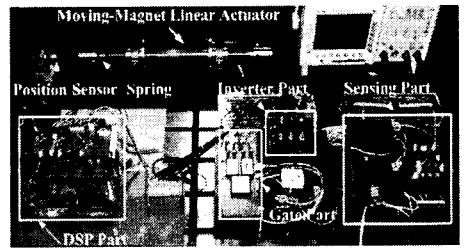


그림 4. 액추에이터의 동특성 실험을 위한 실험 구성 장치.

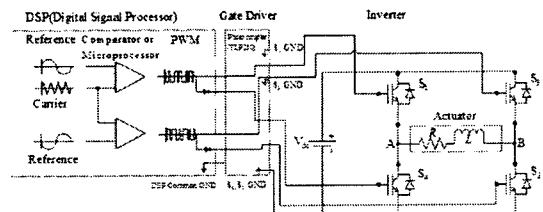


그림 5. 단상 H- Bridge 인버터.

5. 기동자석형 직선형 액추에이터의 동특성

5.1 실험 장치

그림 4는 가동자석형 직선형 액추에이터의 동특성 실험을 위한 실험세트를 보여준다. 실험세트는 가동자 변위를 측정하기 위한 위치센서, 전압 및 전류를 측정하기 위한 센싱파트, PWM 파형 발생을 위한 DSP, 인버터 그리고 가동자석형 직선형 액추에이터로 구성되어 있다.

5.2 구동 회로 해석

그림 5는 가동자석형 직선형 액추에이터의 구동을 위한 단상 인버터를 보여준다. DSP를 이용하여 삼각파가 각각 180도의 위상차를 갖는 정현파와 비교가 되어 그림 6에서 보이는 PWM 전압파형을 얻게 된다. 이 PWM 파형들은 각 스위치의 게이트부에 인가되고 식 (9)와 같은 스위칭 상태를 만들어준다.

$$\begin{cases} S_1 + S_4 = 1 \\ S_2 + S_3 = 1 \end{cases} \quad (9)$$

식 (9)에서 각 스위치는 서로 상보적임을 알 수 있다. 그러나, 두개의 스위치가 한 쌍을 이루는 스위칭 상태가 ON에서 OFF 또는 OFF에서 ON으로 변경 될 때, 그림

5의 확대된 그림에서 알 수 있듯이 반드시 두개 모두 OFF 상태를 짧은 순간동안 유지해야 하는데, 이는 상하 단 스위치의 쇼트를 방지하기 위함이다 [3].

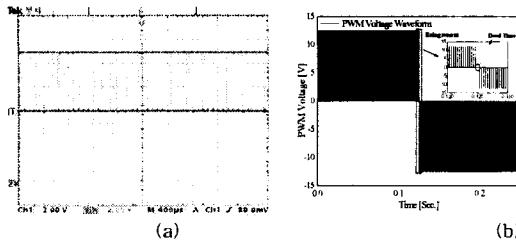


그림 6. PWM 전압: (a) DSP로부터 발생된 PWM 전압의 측정 및 (b) 액추에이터에 적용되는 PWM 전압의 시뮬레이션.

5.3 동특성 시뮬레이션과 실험결과와의 비교

그림 7은 다양한 주파수에 대해 스프링이 없는 가동자석형 액추에이터의 전류 및 변위특성에 대한 동특성 시뮬레이션 및 측정결과를 보여준다. 여기서 우리는 가동자가 $-10\text{mm} \sim +10\text{mm}$ 사이에서만 움직인다고 가정하고 0mm 에서 출발하여 왕복운동한다고 가정하였는데, 가동자의 변위는 $0\sim10\text{mm}$ 사이에서만 즉 편위하여 전동함을 볼 수 있다. 변위에 대한 실험결과 및 시뮬레이션 결과는 대략 잘 일치함을 보이지만, 전류의 경우 실험결과가 시뮬레이션결과보다 더 크게 나왔는데, 이는 시뮬레이션에서는 마찰력이 없다고 가정하였기 때문으로 보인다. 또한, 시뮬레이션 측정결과 모두 주파수가 클수록 전류의 크기가 증가함을 볼 수 있다. 그림 8은 다양한 주파수에 대하여 스프링을 갖는 가동자석형 액추에이터의 전류 및 변위 특성에 대한 동특성 시뮬레이션 및 측정결과를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 변위는 스프링을 고려하지 않는 경우와 다르게 0mm 를 기점으로 $-10\text{mm} \sim +10\text{mm}$ 사이에서 왕복운동을 하며, 주파수가 클수록 변위는 작아진다. 스프링을 고려하지 않은 경우와 마찬가지로 시뮬레이션의 전류 값이 실험결과보다 작게 나왔으며, 특히 이론적인 공진주파수(4Hz)에서 시뮬레이션은 주파수가 증가했음에도 불구하고 전류가 감소하였으나, 실험에서는 여전히 증가를 보였다. 이는 시뮬레이션의 스프링의 탄성계수는 상수로 주어지는 반면, 실제 스프링의 탄성계수는 선형적이지 않고, 또한 스프링의 탄성계수가 정확하게 측정되지 않음으로써 실제공진주파수가 이론적인 공진주파수와 다르기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문은 스프링의 유무에 따른 직선형 액추에이터의 동특성 해석 및 실험을 다루었다. 본 논문에 제시된 결과들로부터, 왕복 구동형 액추에이터는 가능하다면 스프링과 함께 구동하고, 스프링과 함께 구동하는 경우에는 공진 주파수에서 운전을 시켜야 동특성을 개선할 수 있을 것이라는 결론에 도달했다. 본 논문에서는 실험으로 전류 파형으로부터 공진주파수를 찾지 못 하였으므로, 향후 좀 더 정확한 스프링의 탄성계수를 알고 더 많은 실험을 통하여 전류파형으로부터 공진 주파수를 찾을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Nicola Bianchi, "Analytical Computation of Magnetic Fields and Thrusts in a Tubular PM Linear Servo Motor," *IEEE IAS*, vol.1, pp.21-28, Oct. 2000.
- [2] S. M. Jang, J. Y. Choi, S. H. Lee, H. W. Cho and W. B. Jang, "Analysis and Experimental Verification of moving-magnet Linear Actuator with Cylindrical Halbach array," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 4, pp.2068-2070, July. 2004.

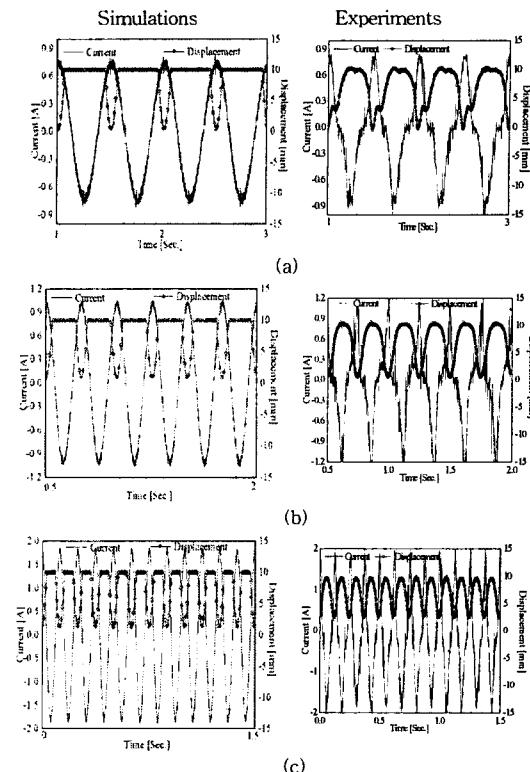


그림 7. 스프링을 갖지 않는 가동자석형 왕복구동 액추에이터의 전류 및 변위 특성에 대한 시뮬레이션 및 측정 결과: (a) 2Hz, (b) 4Hz and (c) 8Hz.

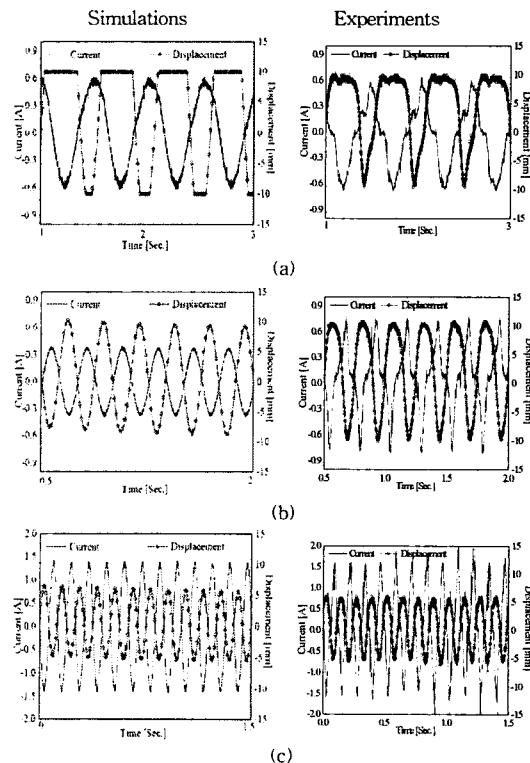


그림 7. 스프링을 갖는 가동자석형 왕복구동 액추에이터의 전류 및 변위 특성에 대한 시뮬레이션 및 측정 결과: (a) 2Hz, (b) 4Hz and (c) 8Hz.