

가동코일형 왕복구동 직선형 액추에이터의 동특성 시뮬레이션 및 실험

장석명*, 양문섭*, 최장영*, 조한욱*
*충남대학교

Dynamic Simulations and Experiments Moving-Coil Linear Oscillatory Actuator

Seok-Myeong Jang*, Mun-Seab Yang*, Jang-Young Choi*, Han-Wook Cho*
*Chungnam National University

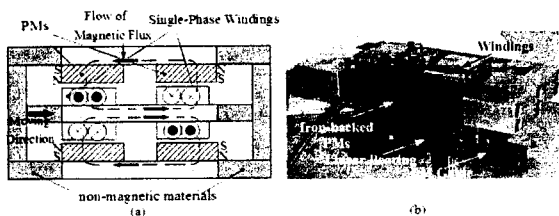
Abstract - This paper deals with the dynamic simulations and experiments of moving-coil linear actuator with/without spring. Dynamic simulation algorithm is established from the voltage and motion equation. Finally, for various values of frequency, dynamic simulation results for characteristics of current and displacement of moving-coil linear actuator with and without spring are presented and confirmed through the experiments.

1. 서 론

산업의 발전에 따라 짧은 스트로크의 선형왕복운동이 요구되는 스틸링 엔진, 공작기기 및 냉장고 컴프레서, 컴퓨터의 디스크 저장 장치, 진동발전기, 섬유기기, 연료 펌프, 인공심장 장치, 능동제어, 초정밀 위치제어에 전자기력 직선왕복 액추에이터(이하 LOA)가 광범위하게 응용되고 있다 [1].

전자기력 직선형 왕복 액추에이터는 가동체의 재질에 따라 가동코일형, 가동철심형, 가동자석형 등으로 구분되는데 성능이 각각 다르므로 응용분야에 따라 적당한 종류를 선정해야만 한다. 가동코일형 LOA는 영구자석에 의해 공극과 철심에서 일정한 자속을 가지므로 철심이 매우 작아, 고정자 요크를 성층 철심으로 하지 않아도 되며 구조가 간단하고 가동자의 관성이 작아 고속의 소변위 왕복운동에 적합할 뿐만 아니라 가동자에 자성체를 사용하지 않으므로 고정자와 가동자 사이에 자기흡인력이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다.

우리는 [2]에서 영구자석 및 코일 전류에 의한 자속밀도에 대한 해석 해를 자기벡터자위 측면에서 유도된 전기적 전달관계를 이용하여 도출했고, 도출된 해석해로부터 가동코일형 왕복구동 직선형 액추에이터(이하 LOA)의 인덕턴스, 역기전력 상수 및 추력상수와 같은 제어 정수를 예측했다. 예측된 제어정수는 유한요소 해석결과 및 실험결과로부터 타당함이 입증되었다. 따라서 본 논문은 가동코일형 시뮬레이션 및 실험을 다룬다. [2]에서 도출한 제어정수를 이용하여 먼저 운동방정식 및 전압 방정식을 이용하여 동특성 시뮬레이션을 위한 상태방정식 및 출력 방정식을 유도하고 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 다양한 주파수에 따른 가동코일형 LOA의 변위 및 전류 변화와 같은 동특성 해석을 수행하였다. 특히, 실험결과가 시뮬레이션 결과의 타당성을 입증하기 위하여 주어졌다.



〈그림 1〉 가동코일형 LOA (a) 구조 및 (b) 실제 제작 모델

2. 가동코일형 LOA의 구조

그림 1 (a) 및 (b)는 가동코일형 LOA의 구조 및 실제 제작 모델을 보여준다. 가동코일형 LOA는 가동자 코일과, 고정자 영구자석, 가동자와 고정자사이의 일정한 공극으로 구성되었음을 알 수 있다.

3. 동특성 시뮬레이션 알고리즘

3.1 전압방정식 및 운동방정식

LOA 시스템의 기계적인 운동방정식은 식 (1)과 같다 [3].

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = K_f i - kx - C_d \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

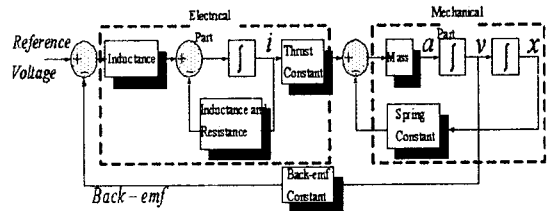
여기서 k 와 C_d 는 각각 스프링의 탄성계수와 마찰계수이며, M 및 x 는 가동자의 질량 및 변위를 나타낸다. 코일에서의 전압방정식은 식 (2)과 같다 [4].

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + K_e \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

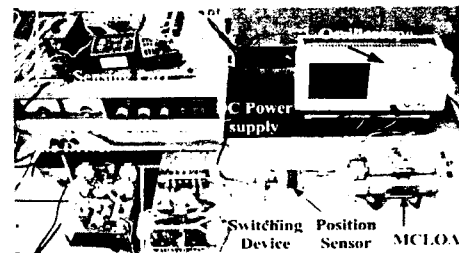
식 (2)의 우변 첫 번째 항은 저항에 의한 전압강하를 나타내며, 두 번째 항은 변압기 기전력 항이고 세 번째 항은 속도기전력 항이다.

3.2 시뮬레이션 블록도

식 (1)과 (2)를 이용하여 그림 2로 주어지는 가동코일형 LOA의 동특성 시뮬레이션 알고리즘을 얻을 수 있다. 그림 2의 모델은 스프링이 있을 때와 없을 때 모두 적용가능하며 스프링이 없을 때 다만



〈그림 2〉 가동자석형 LOA의 동특성 시뮬레이션을 위한 블록도



〈그림 3〉 가동코일형 LOA의 동특성 측정을 위한 실험장치

스프링 탄성계수를 0이라하면 된다. 그림 2의 시뮬레이션 알고리즘으로부터 운전전압 및 주파수에 따른 가동코일형 LOA의 전류 및 전압의 동특성을 얻을 수 있다.

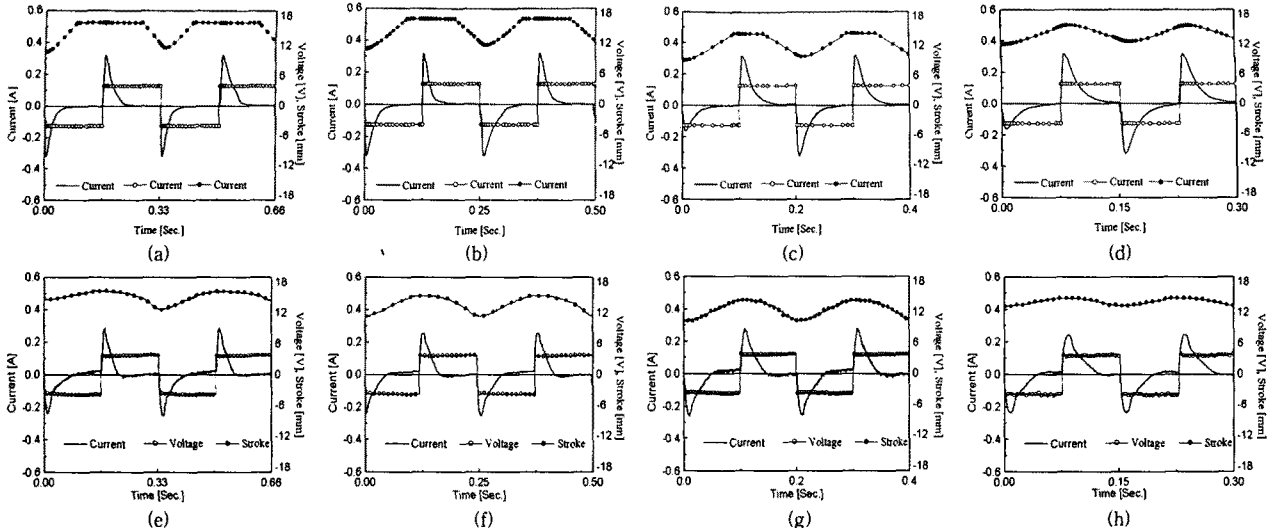
4. 동특성 시뮬레이션 및 실험

4.1 실험장치

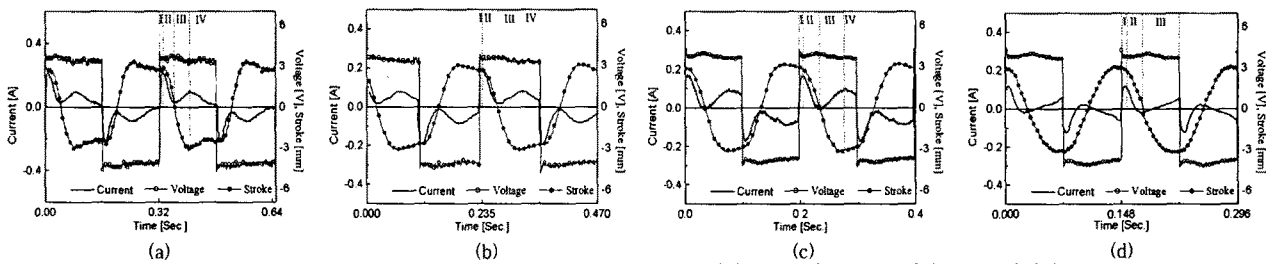
그림 3은 가동코일형 LOA의 동특성 측정을 위한 실험 장치를 보여준다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 실험장치는 가동코일형 LOA, 전압 및 전류의 측정을 위한 센싱 파트, 가동자 변위의 측정을 위한 위치센서, 양방향 구형파 구동을 위한 IGBT로 구성된 스위칭 파트 및 IGBT의 게이트에 신호를 주는 제어부로 구성된다.

4.2 스프링이 없는 가동코일형 LOA의 동특성 결과

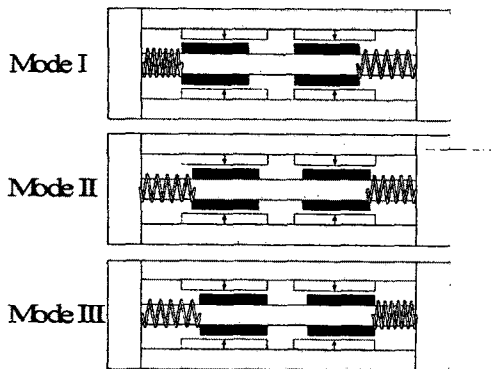
그림 4는 스프링이 없는 경우의 가동코일형 LOA의 동특성 시뮬레이션 결과 및 실험결과를 보여준다. 각 주파수에 따라 실험결과 및 동특성 시뮬레이션 결과는 비교적 잘 일치함을 보이나 각 주파수에 대해 시뮬레이션의 변위가 좀 더 크고 전류의 면적이 작음을 알 수 있다. 이는 시뮬레이션 시 마찰 계수를 0으로 가정함으로써 생긴 결과로 추정할 수 있다. 한편, 동특성 시뮬레이션 및 실험결과 모두 주파수가 증가함에 따라 변위는 감소하고 전류의 면적은 증가함을 알 수 있으며 이로부터 주파수가 커질수록 소비전력이 커짐도 예측할 수 있다.



〈그림 4〉 스프링이 없는 가동코일형 LOA의 동특성 시뮬레이션 및 실험결과: 시뮬레이션 [(a) 3Hz, (b) 4Hz, (c) 5Hz, (d) 6.57Hz] 및 측정 [(e) 3Hz, (f) 4Hz, (g) 5Hz, (h) 6.57Hz]



〈그림 5〉 스프링을 갖는 가동코일형 LOA의 동특성 실험결과: (a) 3Hz, (b) 4Hz, (c) 5Hz 및 (d) 6.57Hz



〈그림 6〉 스프링을 갖는 가동코일형 LOA의 동특성 실험결과에 대한 가동자 위치별 해석을 위한 블록도

4.3 스프링을 갖는 가동코일형 LOA의 동특성 결과

그림 5는 스프링을 갖는 가동코일형 LOA의 다양한 주파수에 대한 동특성 측정결과를 보여준다. 주파수가 증가할수록 변위는 정형적으로 변하고 전류의 면적은 조금씩 감소함을 알 수 있다. 또한 변위는 0을 기점으로 해서 +에서 -사이의 변위를 왕복운동 한다. 그림 4의 스프링이 없을 때의 동특성 결과를 각 주파수에 대해 비교하여 보면 스프링을 갖는 경우의 변위가 좀 더 길며 항상 0을 기점으로 움직임을 알 수 있다. 한편, 그림 5의 실험결과에 제시된 전류 파형에 대해 논의하기 위하여 본 논문은 그림 6과 같은 모드별 즉 가동자 위치별 해석을 위한 블록도를 제시하였다. 각 위치에 따른 해석을 다음과 같다.

1) Mode I

그림 6에서 모드 I의 경우 가동자가 스위칭이 바뀌어 지는 순간 즉 오른쪽에서 왼쪽으로 진행하던 가동자를 스위칭이 바뀌어 지면서 왼쪽에서 오른쪽으로 진행하려는 순간을 나타낸다. 이 상태에서는 그림 5에서 알 수 있듯이, 전류가 급격히 증가하는데, 이는 관성을 이기고 진행방향과 반대로 가동자를 밀어줘야 하기 때문인 것으로 사료된다.

2) Model - Model

그림 5에 제시된 모드 II 구간에서는 전류가 급격히 감소함을 알 수 있는데, 이는 그림 6의 모드 II에서 알 수 있듯이, 모드 I에서 바뀌어진 스위칭에 의해 일단 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이기 시작하면 스프링의 탄성력의 도움으로 적은 전류로도 가동자가 초기위치 즉 변위가 0인 지점으로 이동함을 알 수 있고 이때의 변위 변화는 그림 5를 통해 역시 확인할 수 있다.

3) Mode II~Model III

그림 5의 모드 III에서는 전류가 다시 증가를 시작하는데 이는 가동자가 그림 6의 모드 II에서 III로 이동 중 스프링을 다시 밀어줘야 하기 때문에 증가하는 것으로 예측할 수 있다.

4) Mode IV

그림 5의 모드 IV는 그림 6의 모드 III의 위치에 있는 시간으로 그림 5(d)에서 알 수 있듯이 주파수가 높아 변위가 거의 정형적으로 되면 그림 6의 모드 III상태의 지속은 없지만, 그림 5(a)~(c)에서 알 수 있듯이 주파수가 낮으면 즉 스위칭 시간이 길면 그림 6의 모드 III의 지속상태가 다음 스위칭이 있기까지 지속되며 이는 그림 5(a)~(c)의 변위로부터 확인할 수 있다. 또한 그림 6의 모드 III상태의 지속은 움직임이 없음을 의미하므로 그림 5(a)~(c)의 모드 IV에서 전류가 감소함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 가동코일형 LOA의 동특성 시뮬레이션 및 실험결과에 대하여 다루었다. 전압 방정식 및 운동방정식으로부터 상태방정식 및 출력 방정식을 유도했으며 이로부터 동특성 시뮬레이션 알고리즘을 구성하였다. 다음으로 이미 구해진 제어정수를 동특성 시뮬레이션 알고리즘에 대입하여 다양한 주파수에 따른 전류 및 변위와 같은 동특성 해석결과를 제시하였다. 다음으로 게이트 구동회로 및 스위칭 파트와 같은 하드웨어를 직접 제작하여 다양한 주파수에 따른 그리고 스프링 유무에 따른 동특성 실험 역시 수행하였다. 특히 스프링이 없는 경우의 실험결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 매우 잘 일치함을 확인하였고 스프링을 갖는 가동코일형 LOA의 실험결과를 가동자 위치별 해석을 통해 실험결과와 타당성을 입증하였다. 향후 연구에서는 스프링을 갖는 경우에 대한 동특성 시뮬레이션을 수행해 나갈 것이다.

[참고 문헌]

[1] Sang-Sub Jeong, Dynamic analysis of linear oscillatory actuator for vibration control system, Ph.D. dissertation, Chungnam Nat'l Univ., Korea, 2002.
 [2] David L. Trumper, Memver, Won-jong Kim, Student Memver, IEEE, and Mark E. Williams. IEEE Transactions on Industry Applications. vol. 32, no 2 MARCH/APRIL 1996, PP371~379
 [3] 장석명, 최장영, 조한욱, 박지훈, 정상섭. "전자기적 전달관계를 이용한 가동코일형 LOA의 전자기적 특성해석 및 제어정수 도출", 2005년 2대 대한전기학회 추계학술대회, 2005.10.
 [4] David L. Trumper, Won-jong Kim and Mark E. Williams, "Design and Analysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 2, pp.371-379, 1996.