

스프링 유무에 따른 가동자석형 직선형 액추에이터의 동특성해석 및 실험

論 文
55B-1-4

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

張錫明* · 崔璋英† · 俞大濬**
(Seok-Myeong Jang · Jang-Young Choi · Dae-Joon You)

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 such as thrust constant, back-emf constant, inductance and resistance 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 current and displacement of moving-magnet linear actuator with and without spring are presented and confirmed through the experiments. In particular, This paper applies the PWM voltage waveform obtained from a DSP for bidirectional voltage drive to the actuator.

Key Words : Moving-Coil Type LOA, Moving-Magnet Type LOA, Magnetic Field, Flux Linkage, Motor Thrust and Back Emf

1. 서 론

영구자석 기기들은 산업자동화, 사무자동화 그리고 로봇 산업과 같은 분야에서 직선운동을 위한 용도로 쓰임이 늘어 가는 추세이다 [1]. 실제로, 이러한 영구자석 직선형 기기들은 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 [2-3].

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 [4].

따라서 본 논문에서는 LOA로 구동되는 시스템의 전류 및 변위와 같은 동적 특성에 스프링이 미치는 영향에 대하여 알아보고자 한다. 우선, 양방향 구동을 위한 양방향 전압을 액추에이터에 공급하기 위하여 DSP를 이용한 단상 PWM 전

압 파형을 실험을 통하여 구현하고 시뮬레이션을 위하여 역시 MATHWORK 사의 SIMULINK를 통하여서도 구현하였다. 또한, 공간고조파법으로 도출된 특성식 및 실험으로부터 추력 상수, 역기전력 상수, 저항 및 인덕턴스와 같은 제어정수를 도출하고, 전압방정식 및 운동 방정식으로부터 시뮬레이션 알고리즘을 도출하였다. 도출된 시뮬레이션 알고리즘으로부터 스프링의 유무에 따른 가동자석형 직선형 액추에이터의 전류 및 변위특성을 다양한 주파수에 따라 알아보고, 시뮬레이션 결과는 실험결과와의 비교를 통하여 타당성을 검증하였다. 특히 실험결과에서 공진 주파수에서의 전류 감소 특성을 얻지 못한 이유를 질량 및 스프링 탄성계수 측면에서 자세하게 다루었다.

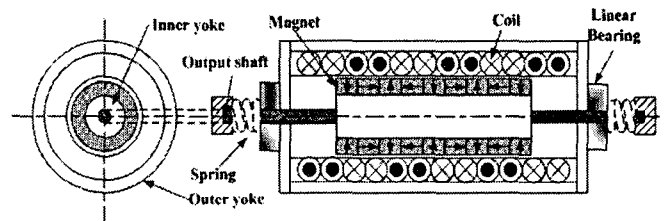


그림 1 가동코일형 LOA의 구조
Fig. 1 Structure of moving-coil LOA

2. 가동자석형 왕복 액추에이터의 구조

그림 1은 본 논문에서 다루고자하는 가동자석형 왕복액추에이터의 구조를 보여준다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 기하학적인 구조는 원통형으로 영구자석의 이용률이 매우 높은 구조로 되어 있으며 가동자 영구자석의 배열은

† 교신저자 : 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程
Email : aramis76@cnu.ac.kr

* 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

** 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2005年 10月 2日

最終完了 : 2005年 12月 2日

Halbach 배열이 사용되었고, 코일은 단상권선을 사용하였다. 특히 Halbach 배열은 일반적인 영구자석 배열에 비해 공극 자속밀도의 기본 파 성분이 1.4배 더 크므로 결과적으로 전력 효율은 2배가 큰 장점과 공극 자속밀도의 정현성이 우수하므로 결과적으로 제어 구조가 간단해지는 장점을 갖는 것으로 알려져 있다. 한편, 본 논문에서 제작되어진 액추에이터의 사양은 극 간격 20mm이고 동일한 너비를 갖는 영구자석 두 편이 한극을 구성한다. 영구자석의 잔류자속밀도가 1.1T 인 NdFeB30을 사용하였고, 극 당 코일 턴 수는 100턴이다. 영구자석의 내 반경 및 외 반경은 각각 20mm 와 30mm 이고, 고정자 코일의 그 것은 각각 31mm와 35mm이다.

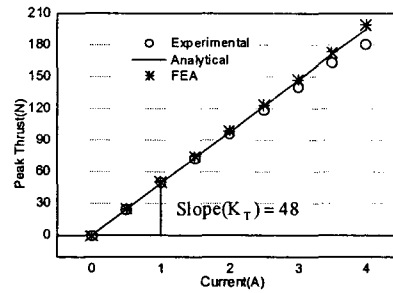
3. 제어정수 도출

제어 정수를 도출하는데 있어서 본 논문은 해석적 방법 및 실험적 방법을 사용하여 도출하였다. 그 결과는 표 1에 보이며, 해석 값 및 실험값은 잘 일치함이 보인다. 해석적으로 제어정수를 도출하기 위하여 본 논문은 2차원 원통좌표계 및 자기벡터 자위로부터 유도된 영구자석 및 코일에 의한 자계로부터 각각에 대한 쇄교자속 및 추력 특성에 대한 해석 해를 유도 했다. 이로부터 추력상수, 역기전력 상수 및 인덕턴스와 같은 제어 정수를 해석적으로 예측하였다. 이 해석 해에 대한 수식적 표현은 참고문헌 [5]에 자세하게 기술되었다. 그림 2 (a)와 (b)는 각각 정추력 및 역기전력에 대한 해석 값, 유한요소 해석 값 및 실험값과의 비교를 보여준다. 우리는 두 대의 동일한 액추에이터를 제작하였기 때문에 한 대는 전동기로 구동하고 그 전동기의 속도에 의존하여 나머지 한대가 발전기로 동작되어 발생하는 전압파형으로부터 역기전력을 실험적으로 얻을 수 있었다 [6]. 각각의 제어 정수에 대한 값들은 모두 잘 일치함을 보이고, 다만 역기전력의 해석 값 ($K_E=48$) 과 실험값 ($K_E=46$) 사이의 약간의 오차가 보이는데 그 이유는 다음과 같다. 그림 2 (b)에 보이는 속도는 등속도이나, 본 논문에서 제작한 액추에이터의 가동자 변위는 -10mm ~ +10mm로 매우 짧기 때문에 등 속도를 측정할 수가 없어서 어쩔 수 없이 실험값의 속도로 평균속도를 사용하였다. 이로 인해 등속도로 산정된 해석 값과 평균속도로 산정된 실험값 사이의 약간의 오차가 보이는 것으로 사료된다.

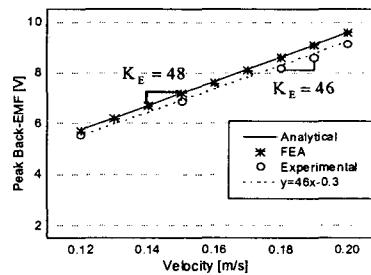
표 1 원통형 Halbach 배열 영구자석을 갖는 가동자석형 LOA의 제 정수

Table 1 Estimated Control Parameters of Moving-magnet LOA with Cylindrical Halbach Array

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	



(a)



(b)

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

Fig. 2 Comparison of among analytical, FE and experimental results : (a) static thrust and (b) back-emf

4. 시뮬레이션 알고리즘

스프링을 갖는 가동자석형 LOA 시스템의 기계적인 운동방정식은 식 (1)과 같다 [7].

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

여기서 M 과 K_T 는 각각 가동자의 질량 및 추력상수이며, C_d 와 dx/dt 는 각각 탄성계수, 마찰계수 및 가동자 속도이다. 한편, 전압방정식은 식 (2)와 같다.

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

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 (1)과 식 (2)로부터 상태변수나 변화위와 전류인 상태방정식 및 출력방정식을 얻을 수 있으며, 이 방정식으로부터 그림 3으로 주어지는 시뮬레이션 알고리즘을 얻을 수 있다.

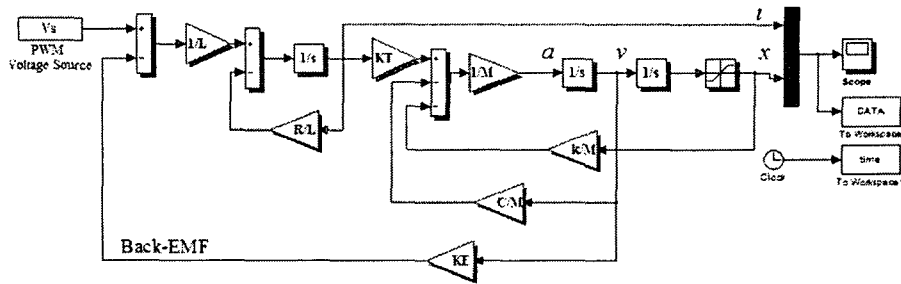


그림 3 동특성 시뮬레이션을 위한 블록 다이어그램
 Fig. 3 Block diagram for dynamic simulations of moving-magnet linear oscillatory actuator

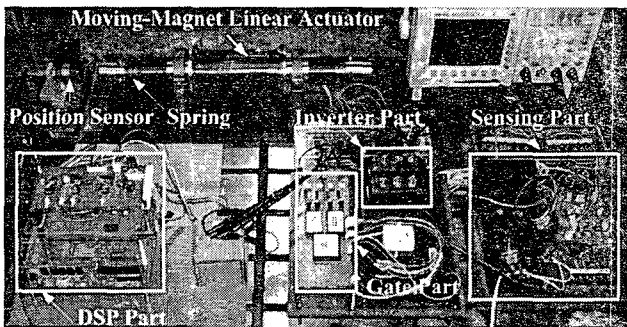


그림 4 액추에이터의 동특성 실험을 위한 실험 구성 장치
 Fig. 4 Experimental sets for measurements of dynamic characteristics for moving-magnet linear actuator

5.2 구동 회로 해석

그림 5는 가동자석형 직선형 액추에이터의 구동을 위한 단상 인버터를 보여준다. 그림 6은 PWM 전압파형을 만들기 위한 서로 180도의 위상차를 갖고 크기가 0.8인 기준 파를 보여준다. 그림에서 아래쪽 톱니파의 경사도를 조절하여 기준파의 주파수를 바꾸어 주게 되며, 결과적으로 액추에이터에 인가되는 PWM 전압 파형의 주파수를 변조하게 된다. 그림 6에 보이는 기준 파와 삼각파를 DSP를 이용하여 발생시키고 서로 비교하여 그림 7 (a)에 보이는 PWM 전압파형을 얻게 된다. 이 PWM 파형들은 각 스위치의 게이트부에 인가되고 식 (3)과 같은 스위칭 상태를 만들어준다.

$$\begin{cases} S_1 + S_4 = 1 \\ S_2 + S_3 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

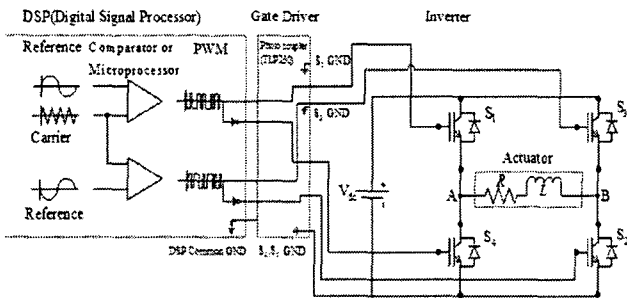


그림 5 단상 H- Bridge 인버터
 Fig. 5 Single-phase 'H-bridge' Inverter

여기서, S1~S4는 스위칭 함수이며 on일 때 1, off일 때 0을 값을 갖는다. 또, 식 (3)에서 각 스위치는 서로 상보적임을 알 수 있다. 그러나 한 쌍을 이루는 각 스위치의 스위칭 상태가 ON에서 OFF 또는 OFF에서 ON으로 변경 될 때, 반드시 두개 모두 OFF 상태를 짧은 순간동안 유지해야 하는데, 이는 상.하단 스위치의 쇼트를 방지하기 위함이며, OFF되는 시간을 'dead time'이라한다 [8]. 그림 7(b)는 시뮬레이션으로부터 얻어진 그림 5에서 A-B 단자사이의 전압을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 액추에이터에 적용되는 전압은 교번전압임을 알 수 있다.

5. 가동자석형 직선형 액추에이터의 동특성

5.1 실험 장치

그림 4는 가동자석형 직선형 액추에이터의 동특성 실험을 위한 실험세트를 보여준다. 실험세트는 가동자 변위를 측정하기위한 위치센서, 전압 및 전류를 측정하기위한 센싱파트, PWM 파형 발생을 위한 DSP, 신호를 증폭해주는 게이트 드라이버, 인버터 그리고 가동자석형 직선형 액추에이터로 구성되어 있다. 특히 게이트 드라이버는 DSP에서 발생한 신호를 증폭시켜 줄뿐만 아니라 DSP와 인버터 사이에서 DSP를 보호하는 기능도 수행한다.

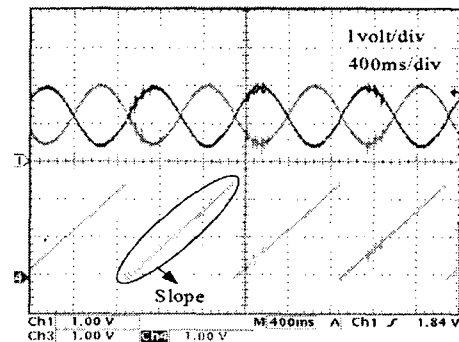


그림 6 PWM 파형을 만들기 위한 기준 파형
 Fig. 6 Measurements for reference waveform

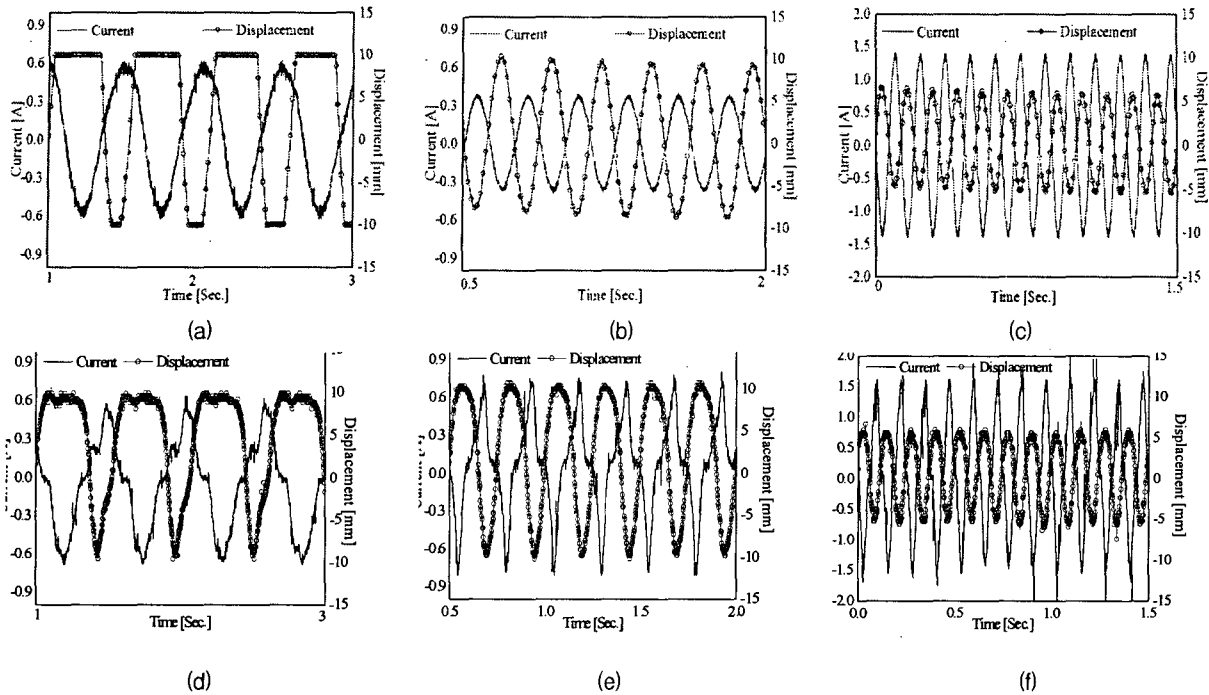


그림 9 스프링을 갖는 가동자석형 왕복구동 액추에이터의 전류 및 변위 특성에 대한 시뮬레이션 및 측정 결과: 시뮬레이션 [(a) 2Hz, (b) 4Hz and (c) 8Hz] 및 실험 [(d) 2Hz, (e) 4Hz and (f) 8Hz]

Fig. 9 Simulation and measurement for current and displacement of moving-magnet linear actuator with spring: (a)simulations [(a) 2Hz, (b) 4Hz and (c) 8Hz] and measurements [(d) 2Hz, (e) 4Hz and (f) 8Hz]

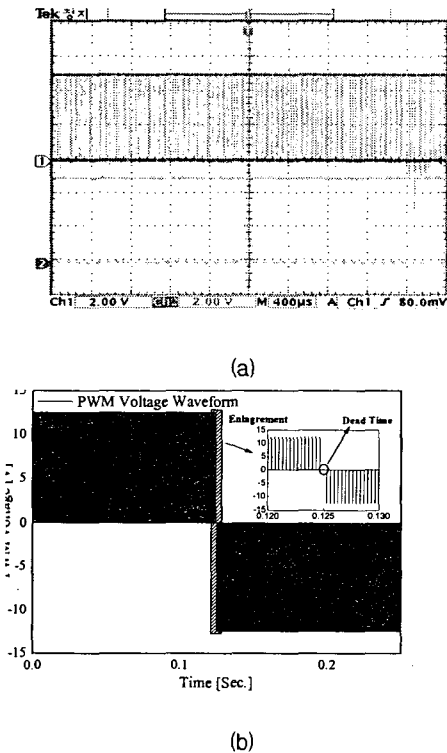


그림 7 PWM 전압: (a) DSP로부터 발생된 PWM 전압의 측정 및 (b) 액추에이터에 적용되는 PWM 전압의 시뮬레이션
 Fig. 7 PWM voltage: (a) Measurements of PWM voltage generated from DSP and (b) Simulation results of PWM voltage applied to the actuator

5.3 동특성 시뮬레이션 과 실험결과와의 비교

그림 8은 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 왕복운동 한다고 가정하였는데, 가동자의 변위는 $0 \sim 10\text{mm}$ 사이에서만 즉 편위하여 진동함을 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 때문이다. 또한, 시뮬레이션 측정결과 모두 주파수가 클수록 전류의 크기가 증가함을 볼 수 있다. 그림 9는 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 (약4Hz)에서 시뮬레이션은 주파수가 증가했음에도 불구하고 전류가 감소하였으나, 실험에서는 여전히 증가를 보였다. 이는 실제적인 공진주파수가 이론적인 공진주파수와 다르다는 것을 의미하며 다른 이유에 대하여는 다음 절에서 자세하게 다룰 것이다.

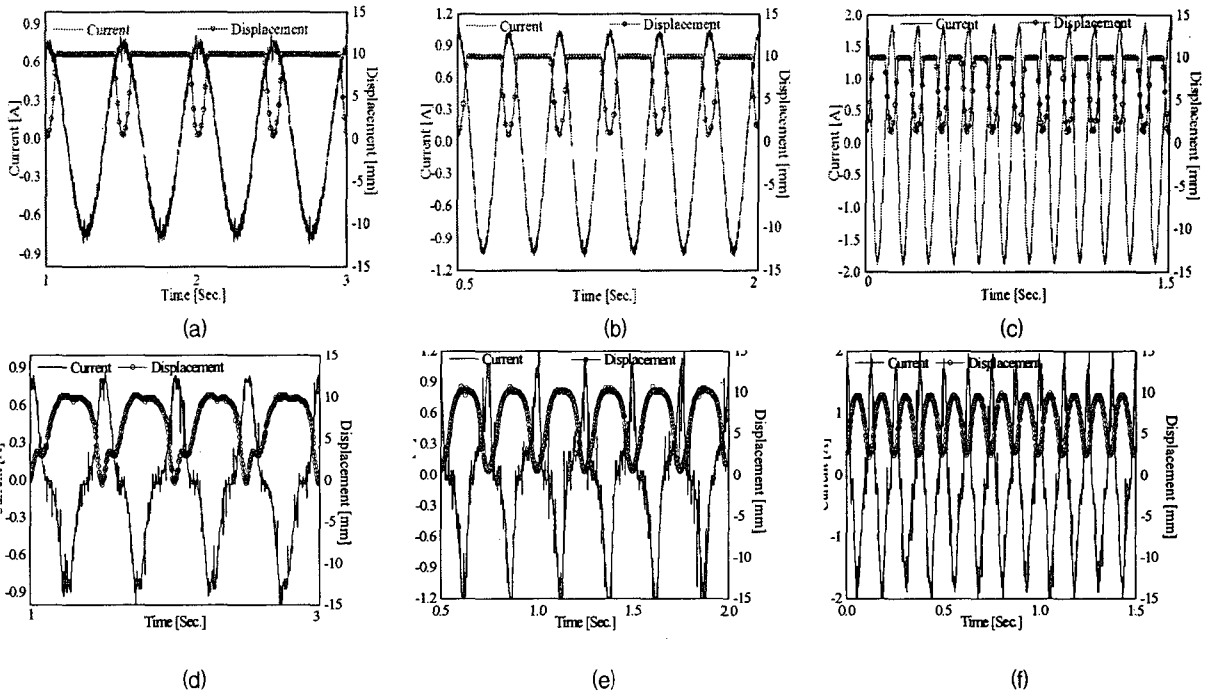


그림 8 스프링을 갖지 않는 가동자석형 왕복구동 액추에이터의 전류 및 변위 특성에 대한 시뮬레이션 및 측정 결과: 시뮬레이션 [(a) 2Hz, (b) 4Hz and (c) 8Hz] 및 실험 [(d) 2Hz, (e) 4Hz and (f) 8Hz]

Fig. 8 Simulation and measurement for current and displacement of moving-magnet linear actuator without spring: (a)simulations [(a) 2Hz, (b) 4Hz and (c) 8Hz] and measurements [(d) 2Hz, (e) 4Hz and (f) 8Hz]

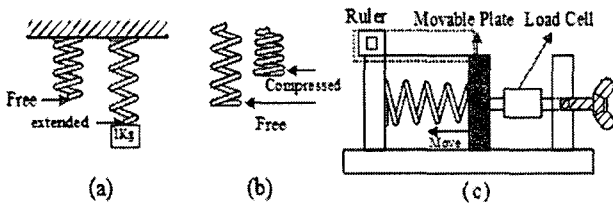


그림 10 스프링의 탄성계수 측정 방법: (a) 본 논문에서 사용된 방법, (b) 본 논문에서 사용된 스프링의 성질 및 (c) 제안된 스프링 탄성 계수 측정 방법

Fig. 10 Measurements of the coefficient of the elasticity for spring: (a) the method used in this paper, (b) the characteristic of spring used in this paper and (c) proposed method

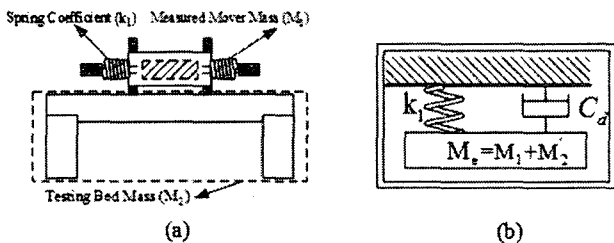


그림 11 (a) 실험 시스템에 대한 개략도 및 (b) 그림 (a)에 보이는 개략도에 대한 등가 질량/스프링 시스템

Fig. 11 (a) The schematic for experimental system and (b) equivalent mass/spring system of the schematic shown in Fig. 11(a)

5.4 동특성 결과에 대한 토의

앞에서 언급했듯이, 시뮬레이션의 경우 4Hz에서의 전류가 2Hz에서의 전류보다 더 작은 반면에 실험결과에서는 주파수가 증가함에 따라 전류가 증가하는 특성을 보였다. 다시 말해서, 실제적인 공진 주파수가 이론적인 공진주파수와 다르다고 예측 할 수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과와 실험결과의 불일치는 여러 가지가 있겠지만 식 (4)로 주어지는 공진주파수에 관련된 식으로부터 크게 두 가지로 주요 원인을 찾을 수 있다.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \tag{4}$$

여기서, M 및 k는 각각 가동체 질량 및 스프링의 탄성계수를 나타낸다. 즉 이론적인 공진주파수를 결정하는 질량과 스프링 탄성계수의 타당한 값을 실험적으로 도출하지 못했다고 할 수 있다. 따라서 타당한 탄성 계수 및 질량을 산정하기 위한 방법을 본 절에서는 다루기로 한다.

5.4.1 스프링의 탄성 계수

그림 10 (a)는 본 논문에서 사용되어진 스프링의 탄성 계수 측정방법을 보여준다. 그러나 그림 10 (b)에서 알 수 있듯이, 본 논문에서 사용된 스프링은 인장 스프링이 아니라 압축 스프링이기 때문에 그림 10 (a)에 제시된 방법으로 측정된 탄성계수 값은 오차를 수반할 것으로 보인다. 그러나 이러한 문제점은 그림 10 (c)에 제시된 스프링 탄성계수 측정방법으로 해결될 수 있을 것으로 사료되므로, 향후 연구에서는 정확한 스프링의 탄성 계수 측정을 위하여 그림 10 (c)에 보이는 측

정 장치를 제작할 예정이다.

5.4.2 유효질량 및 실측질량

본 논문은 공진 주파수를 이론적으로 결정할 때 그림 11 (a)에 보이는 액추에이터의 가동자 무게 M1만을 고려하였다. 그러나 실제 실험에서 액추에이터가 왕복 구동을 할 때 질량 M2를 갖는 테스트 베드 역시 일정한 변위를 갖고 움직일 정도는 아니지만 미세하게 진동함을 알 수 있었다. 따라서 실측된 가동자 무게뿐만 아니라 테스트 베드의 무게 역시 공진주파수 산정에 포함 시켜야 한다. 그러나 앞서서도 언급했듯이 테스트 베드가 일정한 변위를 가지고 움직이는 것이 아니라 진동 수준이므로 유효 질량 M2'를 그림 10 (b)에 보이는 바와 같이 고려해줘야 한다. 여기서 M2'는 기계계에 의해 지배되는 미분 방정식을 풀음으로써 구해질 수 있다. 결과적으로 정확한 공진 주파수를 실험적으로 산정하기 위해서는 액추에이터의 가동자 무게뿐만 아니라 테스트 베드의 유효질량 역시 고려해야만 한다.

6. 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. 또한 이론적으로 계산한 공진 주파수가 실험적으로 측정된 공진 주파수와 거의 일치할 것으로 예상을 하고 연구를 진행하였으나 그렇지 않음을 확인하고 그 이유에 대한 타당한 토의가 이루어 졌다. 마지막으로 본 논문에서 제시한 스프링 탄성 계수 및 가동자 질량 산정 방법을 동원하여 향후 연구에서는 실제적인 공진주파수에 타당한 이론적인 공진주파수를 산출할 것이다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

[1] Jiabin Wang, Geraint W. Jewell and David Howe, "A general frame work for the analysis and design of tubular linear permanent magnet machines", *IEEE Trans. Magn.*, vol.35, no.3, pp.1986-2000, May 1999.
 [2] 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.
 [3] 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.

[4] Richard E. Clark, S.Smith, P.H. Mellor, D. Howe, "Design Optimisation of Moving-Magnet Actuators for Reciprocating Electro-Mechanical Systems", *IEEE Trans. Magn.*, vol.31, no.6, pp.3746-3748, Nov 1995.
 [5] 장석명, 최장영, 유대준, 조한욱, 박지훈, 이성호 "스프링 유무에 따른 가동자석형 직선형 액추에이터의 동특성 해석 및 실험", KIEE 2005 하계 학술대회, 2005. 7
 [6] J. R. Hendershot and TJE Miller, *Design of Brushless Permanent Magnet Motors*. Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1994.
 [7] Mikhaeil-Boules, N., "Design and analysis of linear actuator for active vibration cancellation," in *Proc. IEEE IAS 30th Annu. Meet.*, vol. 1, pp. 469-475, Oct. 1995
 [8] TAKASHI KENJO, *Power Electronics for the Microprocessor Age*. Oxford University Press, 1994

저 자 소 개



장 석 명 (張錫明)

1949년 7월 3일생. 1986년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년 미국 Univ. of Kentucky (방문연구교수), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 현재 당학회 부회장, 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부분회 회장
 Tel : 042-821-5658
 E-mail : smjang@ee.cnu.ac.kr
 Homepage : http://sems.cnu.ac.kr



최 장 영 (崔璋英)

1976년 10월 20일생. 2003년 충남대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
 Tel : 042-821-7608
 E-mail : aramis76@cnu.ac.kr



유 대 준 (俞大濬)

1976년 3월 25일생. 2003년 충남대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업. 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
 Tel : 042-821-7608
 E-mail : ydjgood@cnu.ac.kr