

가동 영구자석형 리니어 진동 액추에이터를 이용한  
진공 펌프의 설계 및 특성해석

조성호, 이동엽, 김덕현, 이호길, 김규탁  
창원대학교 전기공학과, 안동정보대학 전기과, (주)동진정공\*\*

Design and Characteristic Analysis of Vacuum Pump Using  
Moving Magnet type Linear Oscillatory Actuator

Sung-Ho Cho, Dong-Yup Lee, Duk-Hyun Kim, Ho-Kil Lee and Gyu-Tak Kim  
Changwon National Univ., Andong Information Technical College, Dongjin Co.

**Abstract** - This paper deals with the design of vacuum pump using moving magnet type linear oscillatory actuator based on the design procedure and the characteristic analysis. To improve the starting characteristic, the optimum spring constant is detected and redesigned. The parameter was calculated by Finite Element Method(FEM). In order to dynamic characteristic analysis, Time difference method with voltage and kinetic equation is used. The propriety of the improved model is verified through the experimental.

시간에 따라 변위가 정현적으로 변화하는 MM-LOA의 요구추력의 경우 설계사양의 요구출력과 이동변위로 부터 산출할 수 있으며, 동특성에 큰 영향을 주는 가동자 무게도 설계사양으로부터 산출하였다(3). MM-LOA는 퍼미언스법을 이용한 등가자기회로법으로 설계하였으며, 유한요소법을 통해 설계의 신뢰성을 확보하였다. 영구자석은 잔류자속밀도가 0.4(T)인 Ferrite 계열을 사용하였다. 누설자속, 포화 및 기자력 손실계수는 유한요소법을 이용하여 계산하였다. MM-LOA의 설계를 위한 기계적인 방정식과 전기적인 방정식을 결합한 각각의 방정식은 식 (1)과 (2)로 나타낸다.

1. 서 론

진공 펌프와 같은 소변위 왕복운동을 필요로 하는 시스템의 구동원으로 기계식 액추에이터나 회전기가 많이 사용되고 있다. 그러나 회전기를 이용하는 경우에는 회전운동을 직선운동으로 변환하는 변환장치로 인해 시스템 전반의 효율 개선 한계와 속응성 및 구조적인 복잡함 등으로 인하여 선형 진동 액추에이터(Linear Oscillatory Actuator : LOA)에 대한 관심이 고조되고 있다.[1]

가동 코일형 LOA는 정밀성 및 제어응답성이 좋은 장점을 가지고 있으나 가동자 코일에 전원을 공급해야 하므로 구동코일의 내구성, 피로에 의한 파손등의 단점으로 고속운전에 한계가 있다. 따라서 진공 펌프와 같은 정밀성 및 제어응답성을 요구하지 않는 시스템의 경우 가동 영구자석형 LOA가 구동원으로서 적합하다[2].

일반적으로 가동 영구자석형 LOA의 경우 가동자가 갖는 낮은 관성과 기계적, 전기적 시정수등의 원인으로 초기 기동시 시스템을 벗어나는 매우 큰 변위를 갖는 불안정 과도상태가 발생하게 된다. 이와 같은 초기 기동시의 과변위를 억제하기 위하여 스프링 댐퍼를 이용하였다. 초기의 과변위를 억제시키기 위한 최적의 스프링 상수를 도출한 후 LOA를 재설계하므로써 설계사양을 만족시키도록 하였다. 파라메터는 유한요소해석을 통하여 산출하였으며, 과도상태를 포함하는 동특성해석의 경우 기계적인 운동방정식과 전압방정식을 결합하여 시간차분법을 이용하였다.

따라서, 본 논문에서는 설계된 진공펌프용 MM-LOA의 설계기법과 동특성 시뮬레이션 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 시험기를 제작하여 실험하므로써 본 연구의 타당성을 입증하였다.

2. MM-LOA의 설계 및 특성해석

설계하고자 하는 MM-LOA의 설계사양은 표 1과 같다.

전 원	전원주파수	요구출력	최대이동변위
AC 110[V]	60[Hz]	25[W]	±2.5[mm]

$$F = Ma + Dv + kx + F_L \tag{1}$$

$$F_m = NB_g I l = K_f I \tag{2}$$

여기서,  $F$ : 추력,  $M$ : 부하질량,  $D$ : 마찰계수,  $v$ : 속도,  $k$ : 스프링상수,  $F_L$ : 부하추력,  $F_m$ : Lorentz force,  $N$ : 코일 턴수,  $B_g$ : 공극자속밀도,  $l$ : 유효도체길이,  $K_f$ : 추력상수이다.

MM-LOA의 구조는 슬롯, 치가 있는 구조이므로 설계프로그램에서는 Karter 계수로 슬롯에 의한 공극의 증가효과를 보정하였다[4].

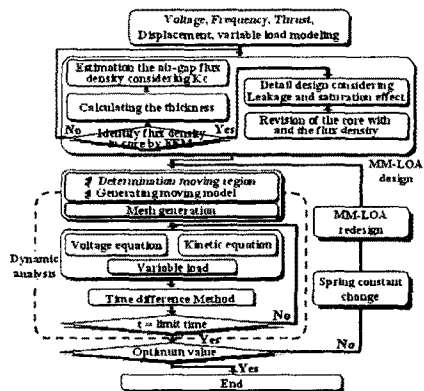
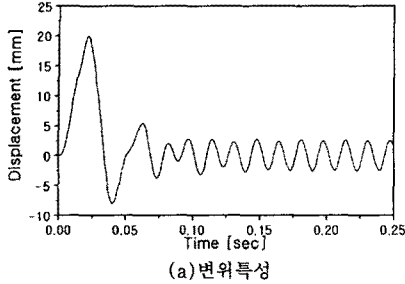


그림 1 MM-LOA의 설계 및 동특성 해석 과정

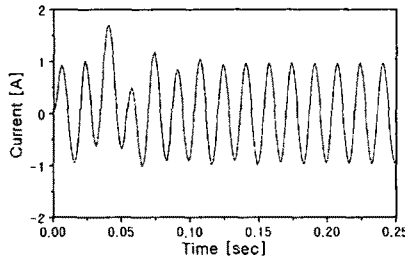
그림 1은 MM-LOA의 설계 및 동특성 해석 과정을 나타낸 것이다. 초기 설계시에는 스프링 상수를 "0"으로 하여 이를 고려하지 않고 설계하였다.

설계된 MM-LOA 모델에 대해서 동특성 해석을 수행하였다. 가동자 이동에 따른 파라메터의 변화를 정확하게 고려하여 동특성 해석을 하기 위해서는 on-line-process에 의한 해석을 수행하여야 한다 그러나 설계된 MM-LOA의 특성해석과 파라메터 평가결과를 살펴보면, 가동자 이동에 따른 인덕턴스와 역기전력

상수는 오차가 없이 거의 일정한 값으로 나타나고 있다. 따라서, 설계된 MM-LOA에 대한 동특성 해석은 오랜 시간을 요구하는 on-line-process를 적용하는 대신 유효요소해석을 통해 구한 파라미터 값들을 근사함수로 처리하여 시간차분법으로 해석하였다.



(a) 변위특성



(b) 전류특성

그림 2 초기 설계된 모델의 동특성 해석

그림 2의 (a)는 시간에 따른 변위특성을 나타내고 있으며, 가동자가 갖는 관성과 기계적, 전기적 시정수 등의 원인으로 초기 기동시에는 정상상태에서의 최대이동변위의 약 8배정도 크게 나타나고 있다. 정상상태에서의 최대이동변위값은 설계사양인  $\pm 2.5(\text{mm})$ 를 만족하고 있다. 그러나, 설계된 모델에서 가동자가 기계적으로 이동할 수 있는 최대 변위는 약  $7(\text{mm})$ 정도로 이 범위를 벗어나지 않게 하는 방법이 설계 및 기계 구조적으로 고려되어야 한다.

### 3. MM-LOA의 기동특성 개선

2장의 해석결과에서 알 수 있듯이 설계된 MM-LOA는 기동초기에 가동자의 과변위현상이 발생한다. 따라서 과변위현상이 발생하는 과도상태를 향상시키기 위한 연구가 먼저 선행되어야 한다. 기존의 MM-LOA를 이용한 진공펌프는 다이어프램식 구조를 사용하여 기동시 생기는 과변위현상을 억제시키고 있으나, 이 구조는 높은 소음과 재질 강도의 부족으로 높은 압력에서는 사용이 제한되는 문제점들이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 해선 피스톤식 구조가 필수적이다. 그러나, 피스톤식 구조를 사용할 경우 기동시 과변위현상은 그대로 문제점으로 남게 된다. 따라서 스프링 댐퍼를 이용하여 기동시 과변위현상을 최소화하도록 하였다.

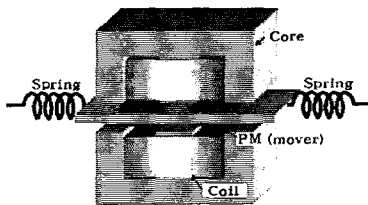


그림 3 스프링을 이용한 MM-LOA의 구조

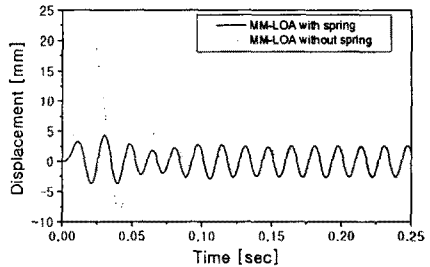
스프링상수  $k$ 는 식 (3), (4)에 의해 구할 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

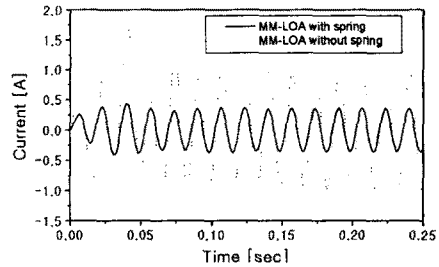
$$k = \omega^2 m = (2\pi f)^2 m \quad (4)$$

그림 3은 스프링을 이용한 MM-LOA의 구조를 나타낸 것이다. 이 구조는 초기 기동시 과변위를 기계적으로 이동 가능한 범위인  $7(\text{mm})$ 이하로 줄일 수 있고, 비운전시 가동자를 시스템의 중심에 위치하게 하는 가동자의 초기위치문제도 같이 해결할 수 있는 구조이다. 그러나 스프링에 의한 공진현상으로 정상상태시 변위가 설계사양의 최대요구변위  $\pm 2.5(\text{mm})$ 를 만족하지 못하게 된다. 따라서 스프링을 고려한 MM-LOA의 재설계가 이루어져야 한다.

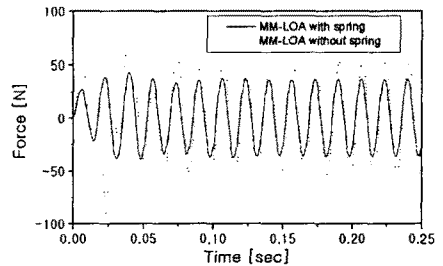
초기 과변위현상을 없앨 수 있는 최적의 스프링상수를 구하고 설계사양도 만족하도록 파라미터 산정 및 동특성 해석을 반복해서 수행하였다.



(a) 변위특성



(b) 전류특성



(c) 추력특성

그림 4 재설계된 MM-LOA의 동특성 해석

그림 4는 재설계된 MM-LOA의 제반 특성을 기본모델과 비교해서 나타낸 것이다. 동특성 해석결과, 기본모델에서 문제가 되었던 초기 기동시 과변위현상은 크게 개선되었다. 기동시 과변위가  $4.42(\text{mm})$ 로 감소하였으며 정상상태시에도 설계사양인 요구이동변위  $\pm 2.5(\text{mm})$ 를 만족하는 양호한 운전을 하였다. (b)는 전류특성으로 스프링의 공진현상에 의해 입력전류는 기본모델에 비해 약  $1/2$ 정도로 크게 줄었다. 추력특성은 기

본 모델에 비해 26[%]정도 감소하였다. 그러나 스프링의 공진에 의해 시스템에서 발생하는 총추력은 설계시 요구추력 53[N]을 만족하였다.

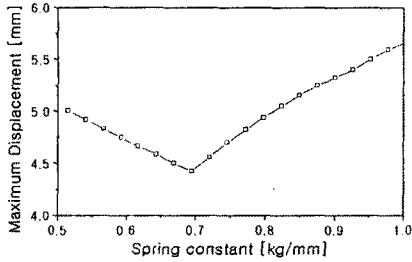


그림 5 스프링상수에 따른 최대변위특성

그림 5은 스프링상수 변화에 따른 초기 기동시 최대 이동변위를 나타낸 것이다. 여기서 스프링상수가 0.694 [kg/mm](완전공진시의 스프링상수의 27[%])일 때 4.42 [mm]로 정상상태시 변위의 1.76배인 아주 양호한 최대변위를 나타냄을 알 수 있다.

#### 4. 시작기를 통한 동특성 해석

시작기를 통해 과도특성개선의 타당성을 입증하기 위하여 재설계된 MM-LOA를 제작하였다. 그림 7은 시작기의 실제 사진이다.

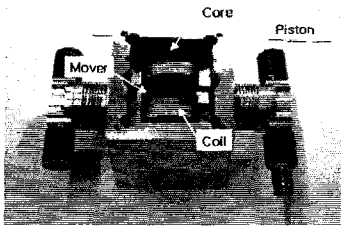


그림 6 진공펌프용 MM-LOA의 시작기

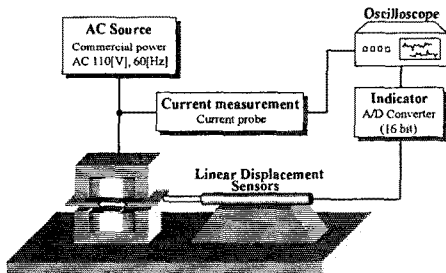
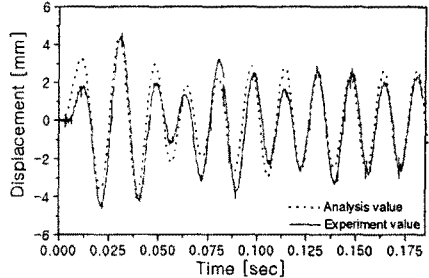


그림 7 시작기의 동특성 측정을 위한 실험장치 구성도

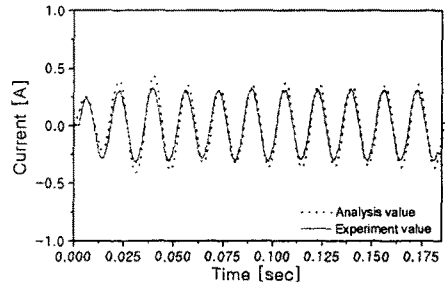
그림 7은 MM-LOA의 동특성 측정을 위한 실험 구성도이다. 가동자 변위를 측정하기 위해 변위센서를 가동자에 부착하여 센싱하였으며 변위센서의 신호를 A/D converter를 통해 변환, 연산하여 변위를 측정하였고 전류도 동시에 측정하였다. 여기서, MM-LOA에 입력되는 전압 및 주파수는 상용전원(AC 110[V], 60[Hz])으로 하였다.

그림 8은 과도상태를 개선시킨 MM-LOA의 동특성을 해석치와 실험치로 비교한 그림이다. 전압인가 후 약 0.125초 이후 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 초기 과도상태에 발생하는 실험치의 시간지연은 변위센서에

의한 지연 때문이라 사료된다. 실험 결과, 전류 및 변위 특성이 해석치와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 MM-LOA의 초기 기동시 과변위현상을 개선하기 위한 스프링 댐퍼의 이용과 이를 고려한 설계의 타당성을 실험으로 입증하였다.



(a) 변위특성



(b) 전류특성

그림 8 시작기의 기동시 동특성 실험결과

#### 5. 결 론

본 논문에서는 MM-LOA에서 발생하는 초기 기동시 과변위현상을 제거하기 위하여 스프링 댐퍼를 이용하였다. 기동시 최대변위를 최소화시킬 수 있는 최적의 스프링상수를 찾고, 그 스프링상수를 고려한 재설계를 통해 설계사양을 만족하면서 과변위현상을 최소화시킬 수 있었다.

본 연구에서 제시된 스프링 댐퍼를 이용한 과도특성 개선의 효과 및 설계, 그리고 MM-LOA의 동특성 해석의 타당성을 검토하기 위해 진공펌프용 MM-LOA의 시작기를 제작하였고 실험을 통하여 입증하였다. 이로써 상용전원을 이용한 정밀성, 제어응답성을 요구하지 않는 진공펌프 등과 같은 시스템에 적합한 MM-LOA를 설계, 응용하기 위한 기반을 확립하였다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] D.H Kim, G.H Kang, J.P Hong and G.T Kim, "An Approach toward Improving Performance of Moving Coil Type Linear Oscillatory Actuator Considering Asymmetric Magnetic Circuit", Conference Record of the 2000 IEEE Industry Application Society, Vol.1, pp.286~292.
- [2] D.H Kim, G.H Kang, J.P Hong and G.T Kim, "Design and Characteristic Analysis of Moving Coil type Linear Oscillatory Actuator Considering Asymmetric Magnetic Circuit", COMPUMAG Conference, Vol. II, pp. 162~163, 2001.7.
- [3] 김덕현, 엄상준, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "불평형 자기회로를 고려한 가동 코일형 리니어 진동 액추에이터의 설계 및 특성해석", 전기학회 논문지, vol. 49B, No. 6, pp.403~409, 2000. 6.
- [4] S.A. Nasar, I.Boldea, "Linear Motion Electric Machines", John Wiley & Sons Inc., 1976.