

가동 영구자석형 리니어 진동 액츄에이터를 이용한 진공 펌프의 설계 및 특성해석

조성호, 김덕현, 김규탁
창원대학교 전기공학과, 안동정보대학 전기과

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

Sung-Ho Cho, Duk-Hyun Kim and Gyu-Tak Kim
Changwon National Univ., Andong Information Technical College

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.

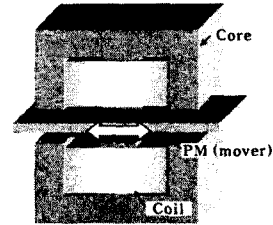


그림 1. MM-LOA의 구조

그림 1은 설계하고자 하는 MM-LOA의 구조를 나타낸 것이다. 이러한 구조는 형상이 간단하여 제작이 용이하고 자기회로의 경우 대칭 평형 구조이므로 이동변위의 중심이 한쪽으로 치우치는 편심작용이 발생하지 않는 이점이 있다. 인가전압의 주파수가 60[Hz]로 높은 주파수를 사용하기 때문에 철손을 줄이기 위해 코어부는 얇은 강판을 성층하였으며, 영구자석은 전류자속밀도가 약 0.4[T]의 Ferrite계열의 자석을 사용하였다.

1. 서 론

진공 펌프와 같은 소변위 왕복운동을 필요로 하는 시스템의 구동원으로 기계식 액츄에이터나 회전기가 많이 사용되고 있다. 그러나 회전기를 이용하는 경우에는 회전운동을 직선운동으로 변환하는 변환장치로 인해 시스템 전반의 효율 개선 한계와 속속성 및 구조적인 복잡함등으로 인하여 선형 진동 액츄에이터(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 않은 시스템의 경우 가동 영구자석형 LOA의 이용이 요구되고 있다.[2]

따라서, 본 논문에서는 25[W]급 진공 펌프용으로 적합한 가동 영구자석형 LOA의 설계과정을 제시하고 요구사항을 만족하는 액츄에이터를 설계하였다. 먼저 가동자 이동에 따른 파라미터의 변화를 고려하기 위해 질점 이동기법을 이용한 유효요소해석을 수행하여 파라미터를 산출하였으며, 가속, 감속, 정지동작을 반복하는 LOA의 경우 과도상태를 포함하는 동특성해석이 매우 중요하므로 기계적인 운동방정식과 전압방정식을 결합하여 시간차분법으로 해석하였다. 가동 영구자석형 LOA는 가동자가 갖는 관성과 기계적, 전기적 시정수등의 원인으로 초기 기동시 시스템을 벗어나는 매우 큰 변위를 갖는 불안정 과도상태가 발생하며 이를 향상 시키기 위해 스프링 댐퍼를 이용하였다. 최소의 과변위를 갖는 최적의 스프링 상수를 찾고 이를 고려하여 다시 재설계하므로써 설계사항을 만족하였다.

2. MM-LOA의 설계 및 해석

2.1 MM-LOA의 설계

설계하고자 하는 MM-LOA의 설계사항은 표 1과 같다.

표 1 설계사항

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

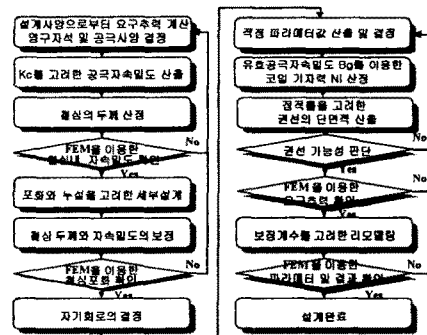


그림 2 MM-LOA 설계과정

그림 2는 MM-LOA 설계과정을 나타낸 것이다. 설계사항으로부터 요구추력을 산출하였고 슬롯, 치가 있는 구조이므로 슬롯에 의한 공극의 증가효과는 Karter 계수로 보정하였다.[3]

$$K_c = \frac{\tau_l(5g+w_s)}{\tau_l(5g+w_s)-w_s^2} \quad (1)$$

$$g_e = K_c \cdot g \quad (2)$$

여기서, τ_l : 치 피치, g : 실제 공극길이, w_s : 슬롯 폭, g_e : 유효 공극 길이다.

이동자의 전체 크기를 결정하기 위해 식 (3)과 같은 운동방정식으로부터 이동자의 질량을 계산할 수 있다.

$$M_t = \frac{F}{a_{\max}} \text{ [kg]} \quad (3)$$

$$a_{\max} = r_{\max} \omega^2 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (4)$$

여기서, M_t : 이동자의 전체질량, F : 요구추력,
 a_{\max} : 이동자의 최대가속도, r_{\max} : 이동자의 최대변위이다.
 누설자속, 포화 및 기자력 손실계수등의 세부설계는 유한요소법을 이용하였다.

2.2 MM-LOA의 사양

설계과정에 의해 설계된 MM-LOA 모델의 치수와 사양이 그림 3 및 표 2에 나타내었다.

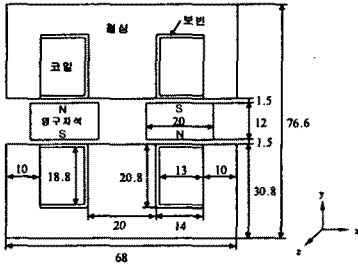


그림 3. 기본 모델의 치수 [단위 : mm]

표 2. 설계된 기본모델의 사양

항 목	값	단 위
철 심	두께	0.01
	폭	0.042
영구자석	잔류자속밀도	0.4
	크기	0.02x0.042x0.012
코 일	recoil permeability	1.07
	턴 수	2240
기 계 적 공 구	저항	43.5
	피복포함 지름	0.000456
	도체 단면적	0.0001257
기 계 적 공 구	0.0015	m
마찰계수	0	N · sec/m

가동자 이동에 따른 파라미터의 변화를 고려하기 위해 절점이동기법을 이용한 유한요소해석을 수행하여 변위에 따른 파라미터를 산출하였다.

인덕턴스 계산은 식 (5)와 같이 유한요소해석으로 산정된 에너지로써 계산하였다.

$$L = \frac{2W}{I^2} \quad (5)$$

역기전력 상수는 식 (6)에 의해 계산 되었다.

$$\begin{aligned} e &= \frac{d\psi}{dt} \\ &= \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \\ &= K_e \cdot v \end{aligned} \quad (6)$$

그림 4는 MM-LOA 설계에 필요한 적정 파라미터를 산정한 것이다. 역기전력 상수는 전기회로 설계시 무리가 따르지 않는 범위에서 산정해야 한다. 여기서는 50

을 산정하였다. 이 경우 그림 4에서 보면 산출된 저항에 따라 인덕턴스는 약 490~510(mH)정도가 되어야 요구 이동변위 ± 2.5 (mm)를 만족할 수 있다.

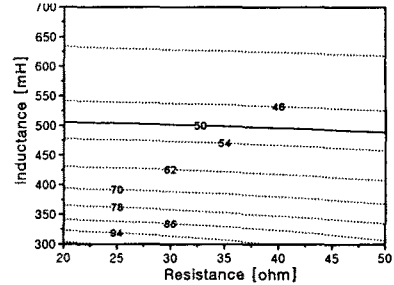


그림 4. 설계 파라미터에 따른 역기전력상수

유한요소해석을 통하여 산출된 인덕턴스와 역기전력 상수를 그림 5와 6에 각각 나타내었다.

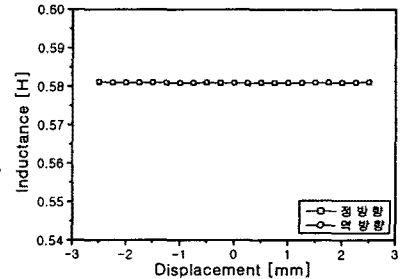


그림 5. 설계된 MM-LOA의 인덕턴스 특성

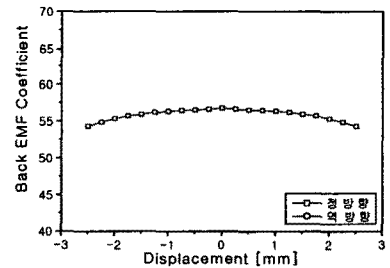


그림 6. 설계된 MM-LOA의 역기전력상수 특성

인덕턴스와 역기전력상수 특성은 가동자 이동방향에 따른 차이가 없으며 이동변위에 관계없이 거의 일정하게 나타나고 있다. 인덕턴스의 크기는 약 580(mH)로서 그림 4과 달리 엔드단의 누설 인덕턴스를 고려하였으므로 70(mH)정도 크게 나타난다.

2.3 특성해석

설계된 MM-LOA의 특성해석과 파라미터 특성 결과를 살펴보면 가동자 이동방향과 이동변위에 따른 인덕턴스와 역기전력상수는 오차가 거의 없이 나타나고 있다. 따라서, 동특성해석은 해석에 오랜 시간을 요구하는 on-line-process를 적용하는 대신 유한요소해석을 통하여 구한 파라미터값들을 근사함수로 처리하여 기계적인 운동방정식과 전압방정식을 결합하여 시간차분법으로 해석하였다.

그림 7은 시간에 따른 변위특성을 나타내고 있으며, 기계적, 전기적 시정수등의 원인으로 기동초기에 요구이동변위의 약 8배 정도의 큰 변위가 나타나고 있다. 설계된 모델에서 가동자가 기계적으로 이동할 수 있는 최대변위는 약 7(mm)정도이며, 이 범위를 벗어나지 않게 할 수 있는 방법이 설계 및 기계 구조적으로 고려되어야 한다.

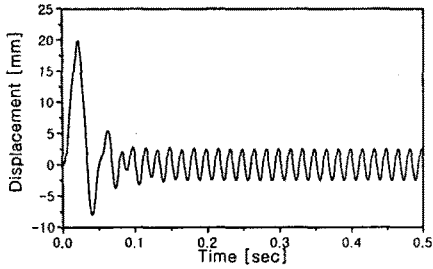


그림 7. MM-LOA의 변위특성

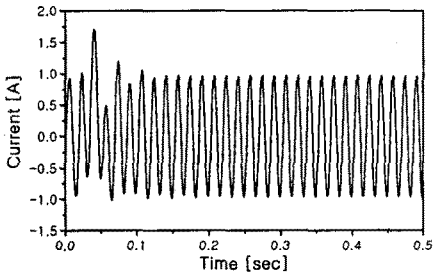


그림 8. MM-LOA의 전류특성

3. MM-LOA 기동특성 개선

2장의 해석결과에서 알 수 있듯이 기동초기에 가동자의 과변위현상이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 스프링 댐퍼를 이용하여 과도특성을 개선하였다.

3.1 스프링 댐퍼를 고려한 설계

기존의 MM-LOA를 이용한 진공펌프는 diaphragm 식 구조를 사용하여 기동시 생기는 과변위현상을 억제시키고 있으나 이 또한 높은 소음과 재질 강도의 부족으로 높은 압력에서는 사용이 제한되는 문제점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해선 피스톤식 구조가 필수적이며 기동시 과변위현상은 스프링 댐퍼를 이용하여 최소화시키도록 하였다.

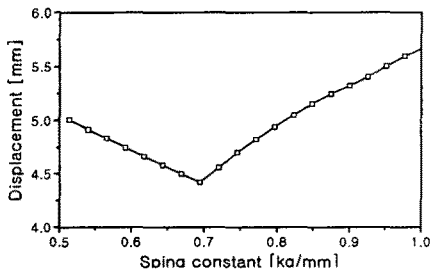


그림 9. 스프링 상수에 따른 최대 변위특성

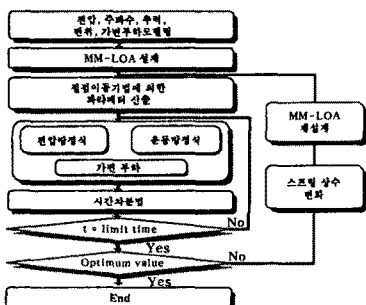


그림 10. MM-LOA의 특성해석 및 재설계과정

그림 9는 스프링 상수의 변화에 따른 최대변위를 나타낸 것이다. 여기서 스프링 상수가 0.694(kg/mm)일 때 4.42(mm)로 정상상태시 변위의 1.76배로 아주 양호한 과도특성을 나타내고 있다. 그러나 스프링에 의한 공진현상으로 정상상태시 변위가 요구변위 2.5(mm)를 만족하지 못하게 된다. 따라서 스프링을 고려한 MM-LOA의 재설계가 이루어져야 한다.

그림 10은 스프링을 고려한 MM-LOA의 재설계과정을 나타낸 것이다.

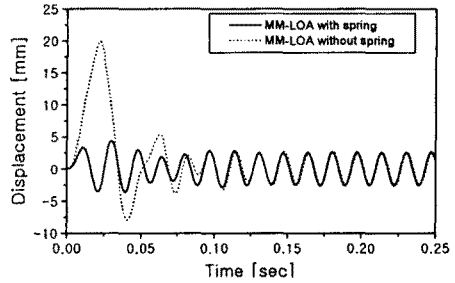


그림 11. 재설계된 MM-LOA의 변위특성

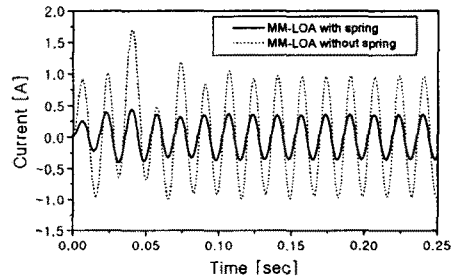


그림 12. 재설계된 MM-LOA의 전류특성

그림 11과 12는 스프링을 고려해 재설계된 MM-LOA와 스프링이 없는 초기 설계된 MM-LOA의 변위 특성과 전류 특성을 비교한 것이다. 정상 상태시 요구변위 2.5(mm)를 만족하면서 과변위현상이 없는 아주 양호한 과도상태를 보이고 있으며 전류 특성은 스프링의 영향에 의해 초기 설계된 모델에 비해 더 작게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 진공펌프용 MM-LOA의 설계 및 특성 해석을 하였다. 제시된 프로세서에 의하여 설계를 수행하였으며 MM-LOA의 초기 기동시 문제점인 과변위현상을 최소화시키기 위해 스프링 댐퍼를 이용하였다. 최적의 스프링 상수값을 고려한 재설계를 통하여 초기 설계사양을 만족함을 확인하였다.

설계된 MM-LOA는 지금 제작중에 있으며 향후 실험을 통해 설계과정의 타당성을 검증하고 동특성에서 결과와도 비교, 분석할 계획이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Amitava Basak, "Permanent-Magnet DC Linear Motors", clarendon Press Oxford, 1996.
- [2] 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.
- [3] S.A.Nasar, I.Boldea, "Linear Motion Electric Machines", John wiley & sons Inc., 1976.