

인버터 특성을 고려한 리니어 진동 액추에이터의 동특성 해석

염상준*, 임기채*, 김덕현**, 강규홍*, 홍정표*, 김규탁*
 *창원대학교 전기공학과, **안동정보대학 전기과

Dynamic Characteristic Analysis of Linear Oscillatory Actuator Considering Inverter Driver

Sang-Joon Eum*, Ki-Chae Lim*, Duk-Hyun Kim**, Gyu-Hong Kang*, Jung-Pyo Hong*, Gyu-Tak Kim*
 *Changwon National University, **Andong Information College

Abstract - This paper deals with the dynamic characteristic analysis of Linear Oscillatory Actuator (LOA) considering Sine Pulse Width Modulation (SPWM) method with H-bridge driver. The input current shape obtained by the driver has great influence on the driving performance of LOA. Therefore, according to the various current shapes, the analysis is achieved by using the combined equation between kinetic and electric circuit equation. Moreover, the parameters in the electric circuit equation are accurately estimated by using FEM.

설계된 MC-LOA가 실제 운전중일 때의 동작상태의 특성을 예상하기 위하여 드라이버를 통하여 입력되는 전압형태를 고려한 동특성 해석을 수행하였으며, 그 결과를 실험치와 비교·검토함으로써 해석의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

2. MC-LOA의 회로정수 산정 및 특성해석

일정 변위에 대한 왕복운동이 요구되는 시스템에 있어서 주로 사용되고 있는 회전형 전동기의 경우, 회전운동을 직선운동으로 변환하기 위해 스크루-너트, 랙-피니언, 기어-체인 등과 같은 별도의 기계적 변환장치가 필요하므로 전체 시스템을 구성함에 있어서 복잡성, 비효율성, 유지보수의 어려움 등의 단점을 가진다.

식 (1)과 (2)는 각각 기계적인 방정식과 전기적인 방정식을 나타내고 이들을 결합하여 요구추력과 발생추력을 계산하였으며, 퍼미언스법을 이용한 등가자기회로법을 통하여 시간에 따라 변위가 정현적으로 변화하는 MC-LOA를 설계하였다. 또한 유한요소법(FEM)을 통하여 설계의 신뢰성을 확보하였다.

$$F = Ma + Dv \quad [N] \quad (1)$$

$$F_m = NB_g I = K_f I \quad [N] \quad (2)$$

한편 직선운동을 필요로 하는 시스템에 선형기기를 적용할 경우 이러한 기계적 변환장치가 필요 없으므로 시스템 구조가 간단해 질 뿐 아니라 효율적인 시스템의 구성이 가능해진다. 하지만 회전기를 구동원으로써 기계적 구조를 통해 이동자의 기하학적 궤적을 결정하는 종래의 액추에이터의 경우와는 달리 인버터를 전원으로써 하는 리니어 진동 액추에이터 (Linear Oscillatory Actuator, LOA)는 그 입력 전원의 특성에 따라 기기의 운전상태가 많은 영향을 받게 된다[1].

여기서, F : 추력[N], M : 부하질량[kg], a : 가속도[m/sec²], D : 마찰계수, v : 속도[m/sec], F_m : Lorentz force [N], N : 코일 턴수, B_g : 공극자속밀도[Wb/m²], l : 유효도체 길이[m], K_f : 추력상수이다.

퍼미언스 계수를 고려하여 영구자석의 동작점을 결정하고 유한요소법을 이용하여 파라미터를 산정하는 등의 설계 과정을 거쳐 최대변위 ±3[mm], 운전 주파수 12[Hz], 전체 부하중량 3[kg]을 만족하도록 설계된 해석모델의 치수와 사양은 그림 1 그리고 표 1과 같다.

영구자석을 포함하는 해석대상의 자기벡터포텐셜 \vec{A} 를 계수수로 하는 지배방정식은 맥스웰 방정식으로부터 식 (3)으로 정의된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{j}_0 + \nabla \times \frac{1}{\mu_r} \vec{M}_r \quad (3)$$

이러한 선형기기중 가동 코일형 LOA (Moving Coil type LOA, MC-LOA)는 간단한 기계적 구조와 적은 가동자의 관성으로 인한 뛰어난 속응성으로 인해 특히 소변위 왕복운동을 필요로 하는 시스템에 적합하다. 그러나 MC-LOA는 완전한 대칭적 구조가 아니므로 불평형한 자기회로를 가지게 되며, 이러한 자기적 불평형은 나아가 가동자의 이동방향에 따른 추력의 차이를 발생시킨다[2]. 이러한 추력의 차이로 인하여 정현적인 입력전원을 사용할 경우 입력 전류의 방향에 따라 가동자 이동변위의 중심이 이동해 가는 현상이 발생하게 되고 결국 시스템에서 요구되는 변위특성을 만족할 수 없게된다[3].

본 논문에서는 이러한 추력의 차이가 발생하는 원인을 규명하고 그 정도를 유한요소법 (Finite Element method, FEM)을 이용하여 정밀하게 분석하여 이를 드라이버 설계에 반영하였다. 즉 추력의 차이를 제거할 수 있도록 정현적인 입력전류가 아닌 이동자의 방향에 대하여 상·하 비대칭적인 전류의 형태를 유출했으며, 이를 구현하기 위해 Sine Pulse Width Modulation (SPWM) 방법을 이용한 H-bridge 드라이버를 제작하였다.

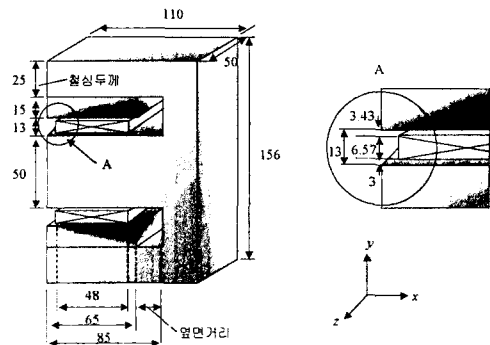


그림 1 해석모델의 치수 [mm]

표 1 설계된 모델의 사양

항목		값	단위
철심	두께	25×10^{-3}	m
	축방향 길이	50×10^{-3}	m
	재질	S30	
영구자석	잔류자속밀도	1.15	T
	폭×길이×두께	$65 \times 50 \times 15 \times 10^{-9}$	m ³
	recoil permeability	1.05	
코일	턴 수	309	턴
	저항	2.71	Ω
	도체직경	0.882×10^{-3}	m'
기계적 공극	도체 단면적	0.5027×10^{-6}	m'
	전류밀도	2.9395×10^6	A/m'
	기계적 공극	3.43×10^{-3}	m
마찰계수	0.003	N·sec/m	

여기서, J_0 는 입력전류밀도, \vec{M}_r 은 영구자석의 잔류자속 방향, μ 는 투자율, μ_r 은 영구자석의 비투자율이다. 식 (1)을 2차원 유한요소해석을 위한 지배방정식으로 다시 쓰면 식 (4)와 같다.

$$-\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = J_0 + J_m \quad (4)$$

여기서, A , J_0 , J_m 은 z방향 성분 벡터를 의미하며 J_m 은 영구자석에 의한 등가자화전류밀도이다.

그림 2는 영구자석과 코일을 동시에 여자시킨 경우 그림 1에서의 영구자석 양쪽 끝단을 잇는 공극 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 가동자가 철심 내부로 진행되는 방향을 정방향, 반대방향으로의 진행을 역방향으로 표시하면 정방향 진행시 공극 자속밀도는 역방향 진행시 보다 현저히 큰 값을 가지게 된다. 이는 자기회로의 불평형으로부터 발생하여 전류 방향에 따른 영향이 이러한 현상과 중첩되어 자속밀도의 불평형이 크게 발생하였기 때문이다. 즉, 영구자속에 의한 자속은 항상 일정한 방향으로 흐르지만, 전류에 의한 자속은 정방향 운전시에는 영구자석에 의한 자속과 중첩되고 역방향 운전시에는 상쇄되면서 나타나는 현상이다.

그림 3은 가동자 진행방향별 추력상수의 분포를 나타낸 것이다. 정방향 진행 시의 추력상수는 역방향 진행시 보다 약 1.05 정도가 크게 나타난다. 이와 같이 정·역방향 운전시의 추력상수의 차이는 그에 대응하는 추력의 차이를 의미하며 그 차이가 클수록 가동자의 이동중심은 급격하게 이동하게 된다. 이러한 추력 차이는 코일 기자력에 의하여 발생하므로 정·역방향 운전시의 추력 차를 최소화하기 위해서는 영구자석에 의한 기자력은 크게 하고 코일 기자력은 작아지도록 LOA를 설계하여야 한다.

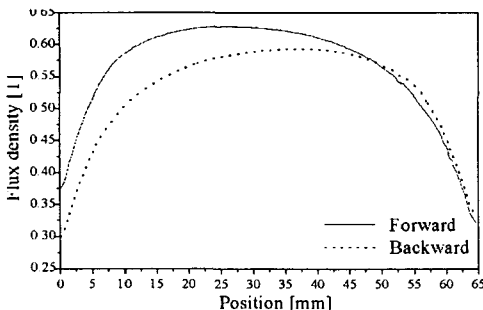


그림 2 공극 자속밀도 분포

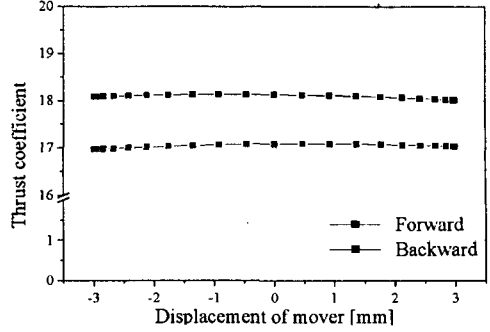


그림 3 가동자의 위치에 따른 추력상수 분포

3. 드라이버의 구현

MC-LOA 구동을 위한 단상 인버터는 전압제어를 위하여 비대칭 PWM을 이용하여 구현된다. 비대칭 PWM은 구현이 간단하기 때문에 소프트웨어에 의한 PWM 발생이 가능하며 이는 마이크로 프로세서와 파워소자의 인터페이스를 크게 줄여 인버터의 구성을 간소화 할 수 있다[4].

비대칭 PWM을 이용하여 MC-LOA의 입력전압을 펄스폭 변조하는 경우, 변조된 펄스폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{pw} = m T_s \sin(2\pi f_m t) \quad (5)$$

여기서, T_s : 샘플링 주기, f_m : 변조파의 주파수, m : 변조지수로 $0 \leq m \leq 1$

식 (5)의 의해 펄스폭의 부호에 따라 H-bridge 스위칭 순서는 반전된다. 실제 마이크로 프로세서를 이용한 구현을 위해서 (5)식은 변조 주파수를 N등분으로 이산화 시키는 경우 다음으로 쓸 수 있다.

$$t_{pw}(k) = m T_s \sin(2\pi \frac{k}{N}) \quad (k = 0, 2, \dots, N-1) \quad (6)$$

본 논문에서는 식 (6)이 '0'의 펄스폭을 가지는 경우를 방지하기 위하여 식 (7)을 이용하여 스위칭에 필요한 펄스폭을 결정하였다.

$$t_{pw}(k) = m T_s \left\{ \sin(2\pi \frac{k}{N}) + \sin(2\pi \frac{k+1}{N}) \right\} \quad (7)$$

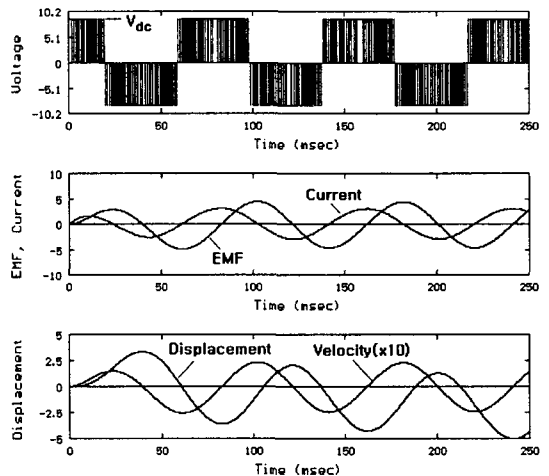


그림 4 PWM을 고려한 동특성 해석



그림 5 제작된 시작기 및 드라이버

4. 동특성 해석 및 실험

본 논문에서는 MC-LOA의 동작상태를 분석하기 위해서 전압방정식과 운동방정식을 결합하여 동특성 해석을 수행하였다. FEM을 이용하여 전압방정식을 구성하는 파라미터들은 산정 하였으며 시간 변화에 대한 특성은 시간 미분항을 이산화시켜 계산하는 시간 차분법을 적용하였다[1].

그림 4는 비대칭 PWM 신호를 이용한 전압제어를 한 경우 동특성해석 결과의 한 예를 나타내었다. 입력전압이 주어졌을 때 전압방정식을 풀고 그 결과를 다시 운동방정식과 결합하여 각 시간 스텝에 따라 반복 계산하였다. 그림에서 PWM 전압 파형을 보면 알 수 있듯이 초기의 PWM 신호는 정상상태의 반만을 인가해 줌으로서 기동시 정상상태와 다른 관성과 역기전력의 영향으로 이동자가 급격하게 이동해 가는 현상을 방지할 수 있다. 한편 그림 5는 실제 제작된 MC-LOA와 이를 구동시키기 위한 드라이버이다.

그림 6과 7은 대칭적 PWM 신호로 인해 만들어진 MC-LOA의 입력전류와 그때의 변위특성을 각각 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과와 같이 변위의 중심은 매우 짧은 시간임에도 불구하고 급격하게 이동해 나감을 알 수 있다.

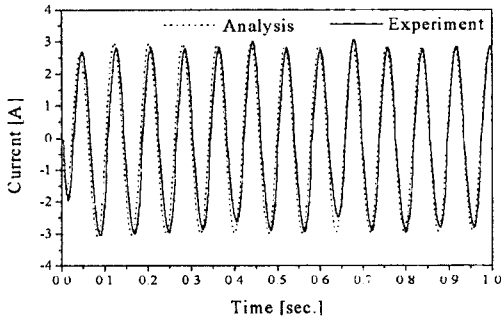


그림 6 대칭의 PWM 신호로 만들어진 전류

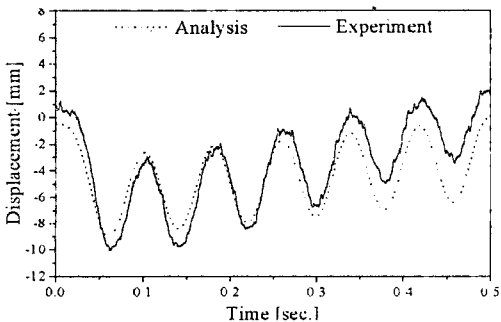


그림 7 대칭의 전류가 인가될 경우 변위특성

한편 그림 8과 9는 추력의 차이를 보상해 주기 위해 비대칭적 PWM 신호를 통해 구현된 입력전류와 그때의 변위특성을 나타내었다. 그림 8에서 알 수 있듯이 전류의 형태는 가동자가 정방향으로 이동할 때 그 크기가 역방향 운전시보다 작음을 알 수 있으며, 그로 인하여 변위특성은 개선되어 안정적인 구동이 되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 MC-LOA의 비대칭적 구조로 인하여 발생하는 자기회로의 불평형 현상과 가동자의 이동방향에 따라 나타나는 추력상수의 차이를 FEM을 이용한 특성해석을 통하여 정밀히 분석하였다. 이러한 특성해석을 바탕으로 드라이버에서 정·역방향 발생하는 추력의 차이를 보상하여 안정적인 MC-LOA의 운전특성을 확보할 수 있는 비대칭적 인가전류의 형상을 제시하였다.

MC-LOA의 안정적 구동을 위한 전류의 형상을 만들기 위해 비대칭 PWM을 이용하였으며, 동작상태의 특성을 예상하기 위하여 PWM 형태의 입력 전압파형을 고려한 동특성 해석을 수행하였고 그 결과를 실험치와 비교·검토함으로써 해석의 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정인성 외, "유한요소법에 의한 리니어 압축기의 압력을 고려한 동특성 해석", 전기학회 논문지, vol. 47, no. 5, pp. 1862~1868, 1998, 11.
- [2] 장석명 외, "영구자석 계자와 전기자 자속의 상호작용 효과를 고려한 가동코일형 리니어모터의 정특성", 전기학회 논문지 48B권 1호, pp19~26, 1999, 1.
- [3] 엄상준, 김덕현, 강구홍, 홍정표, 김규탁, "자기회로 불평형을 고려한 MC-LOA의 설계 및 특성해석", pp. 145~147, vol.A 대한 전기학회 하계학술대회, 1999
- [4] 김태완, 서광덕, "전동차용 고성능 IGBT형 보조전원장치 개발", 전력전자학회 논문지 제4권 제 6호, pp. 500~506, 1999, 12

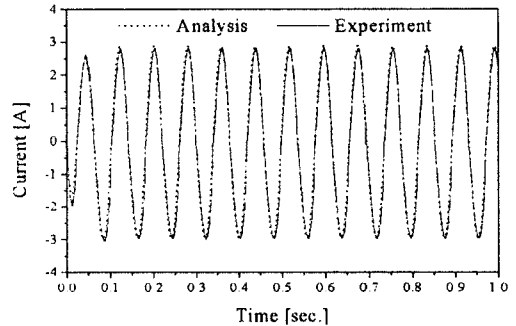


그림 8 비대칭의 PWM 신호로 만들어진 전류

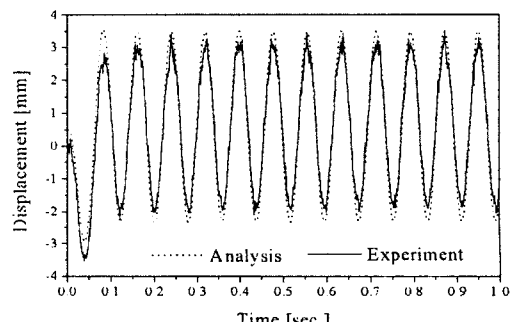


그림 9 비대칭의 전류가 인가될 경우 변위특성