

가동코일형 LOA 전류제어 시뮬레이션 연구

장석명, 권철, 정상섭, 이성래
충남대학교

Current Control Simulation Research of Moving Coil Type Linear Oscillatory Actuator

S.M. Jang, C. Kwon*, S.S. Jeong, S.L. Lee
Chung-Nam National Univ.

Abstract - This paper describes the current control simulation of the Linear Oscillatory Actuator, and then, the dynamic simulation algorithm considering the armature reaction effect. Thirdly, the control algorithm is proposed to reciprocate a load without mechanical spring at the required stroke and position.

1. 서 론

가동코일형 LOA의 발생력은 로렌츠 법칙에 따라 영구자석에 의한 공극자속밀도와 가동코일인 전기자 전류의 곱으로 표현된다. 본 논문에서는 기계적인 스프링을 갖지 않는 가동코일형 LOA의 평형 왕복운동을 위해 PI 제어기를 갖는 구동시스템을 제안하였다^[2]. 또한 이동 변위를 피드백 루프로 하여 가동자의 위치와 스트로크를 제어한 바 있다^[2]. 본 논문에서 발생된 문제점은 주파수가 높아짐에 따라 기준 주파수신호와 전류의 위상 차이가 많이 발생됨을 확인한 바 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 주파수와 위상관계를 사용한 스피드 제어를 하여야만 한다. 따라서 본 논문에서는 출력신호를 속도와 전류로 놓고 상태방정식을 세웠으며 전달함수를 통하여 안정도를 확인하였고 시뮬레이션을 통하여 동적 응답 특성 및 PWM 신호에 대한 인가전류 특성을 알아보았다. 따라서 LOA 구동드라이버에 대한 전류 위상제어를 함으로써 높은 주파수에서도 위상 뒤집 현상을 극복할 수 있어 정밀한 위치제어를 할 수 있는 중요한 변수를 찾을 수 있었다.

2. 본 론

2.1 가동코일형 LOA 모델

가동코일형 LOA는 영구자석에 의한 고정자와 플라스틱 보빈에 코일을 감은 가동자로 구성된다. 그리고 코일에 정현파 또는 구형파의 교번전류를 인가하면 가동자는 일정 스트로크로 고속 왕복운동을 하게된다.

$$F_x = 2lN(B_g + \Delta B)i = K_E i \quad (1)$$

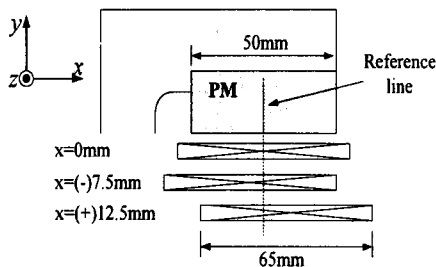


그림 1 기준좌표 및 가동코일의 위치 정의

식 (1)에서 보듯이 추력은 가동자 코일에 흐르는 전류 i 에 의해서 영향을 받음을 알 수 있다.

가동코일형 LOA의 기준좌표 및 가동코일의 위치 정의는 그림 1과 같다.

2.2 운동 및 전압 방정식

가동코일형 LOA의 운동방정식은 식(2)와 같다.

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

여기서 M : 가동부 질량, C_d : 마찰계수, d^2x/dt^2 : 가동자 가속도이다. 또한 전류코일에서의 전압방정식은 식(3)과 같다.

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + K_E \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 상태방정식으로 표현하면 식 (4)와 같다

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_d}{M} + \frac{K_E}{M} & \\ \frac{K_E}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} e \quad (4)$$

시스템 출력은 가동자의 속도와 전류이므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + Du(t) \quad (5)$$

2.3 전달함수 및 안정도 판별

식 (4), (5)는 입력전압의 변화 $\Delta e(t)$ 에 따른 출력의 변화량 즉, 속도와 전류를 나타낸 것으로써 전달함수는 식 (6)을 통하여 구할 수 있다.

$$T_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{U_{(s)}} = C(SI - A)^{-1} B + D \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T_{(s)} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S & -\frac{K_E}{M} \\ \frac{K_E}{L} & S + \frac{R}{L} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{(S^2 + \frac{RS}{L} + \frac{K_E^2}{ML})} \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{K_E}{LM} \\ \frac{S}{L} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, 식 (7)은 식(6)을 통하여 구하여 진 형태로서

마찰계수를 무시하고 표현한 식으로써, 출력변수는 속도와 전류 두 가지로 표현하였으며, 속도를 적분하면 변위를 알 수 있으므로 변위 값을 입력받아 LOA 위치제어를 할 때 기준 주파수 및 이동 변위를 알아내는데 필요하다. 전류는 입력 대 출력의 위상편차를 판별하기 위해 필요하다. 출력을 전류에 대한 전달함수로 나열한 후 표 1에서 제시한 제어정수를 대입하여 전달함수를 완성하면 식(8)과 같다.

표 1 제어 정수

항 목		값
유기전력 상수		60~68[V · sec/m]
추력 상수	Pull effect	70[N/A]
	Push effect	50 [N/A]
코일 DC 저항		5.8 [Ω]
코일 인덕턴스		2.31x+0.116[H]
가동체 질량		23 [kg]

$$T_{v-s(s)} = \frac{\frac{K_E}{LM}}{\left(S^2 + \frac{RS}{L} + \frac{K_E^2}{ML}\right)} = \frac{129.29}{S^2 + 35.15S + 8274.74} \quad (8)$$

그림 (2)는 식(8)에 대한 보드선도를 나타낸 그림이다. 그림 (2)에서 보듯이 10~20Hz 사이에서 공진이 일어날 수 있으며 대역폭은 20Hz 정도까지 나타남을 알 수 있다. 또한 안전하게 정상적으로 운전할 수 있는 영역은 20Hz 이내에서 가능하다. 따라서 20Hz 전후에 위상차를 줄이기 위해서는 제어가 필수임을 알 수 있다.

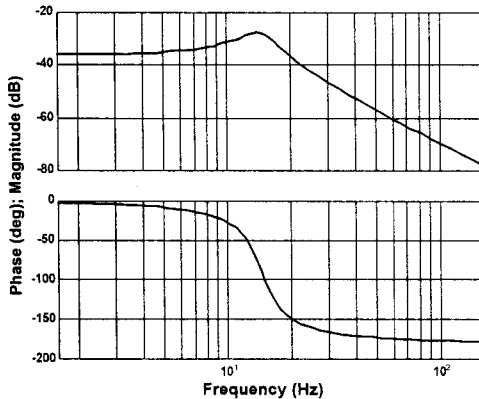


그림 2 보드선도

2.4 PWM 구동 시 전류응답

LOA 구동전원은 PWM(Pulse Width Modulation)구동 방식을 사용하고 있다. PWM구동은 모터를 효율적으로 드라이브하여 구동전류를 임의로 설정할 수 있는 구동방법이다. 모터만이 아니라 스위칭 레귤레이터 등에도 폭넓게 응용되고 있다. 그림 (3)은 LOA에 사용되어지는 PWM 구동의 기본원리 회로이다. 접합형 트랜지스터가 ON/OFF 동작을 함으로써 A점의 전압 파형과 부하전류 파형은 그림 (4)와 같이 된다. 이것은 코일의 과도특성을 이용한 것이다. 전류를 홀리려고 할 때에는 쉽게 전류가

흐르지 않고 전류를 차단하려고 할 때는 쉽게 전류가 감소되지 않는 특성이 있다. 때문에 부하전류의 파형이 삼각파와 같이 된다.

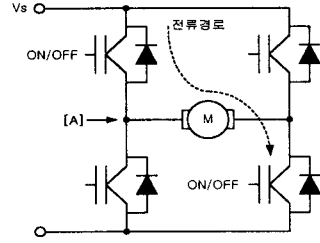


그림 3 LOA 구동 드라이버

또 전원에서 공급되는 전류는 그림 (4)와 같이 간헐적으로 되어, 전력을 평균하면 전류가 작아도 해결된다. 이것이 PWM구동이 고효율인 이유이다. 또한, 그림 5와 같이 전류 값을 트랜지스터의 ON/OFF 듀티에 의해 조절할 수 있다. 트랜지스터의 ON 이 OFF보다 길면 설정 전류가 증가하고 ON이 OFF보다 짧으면 설정전류가 작아지게 된다.

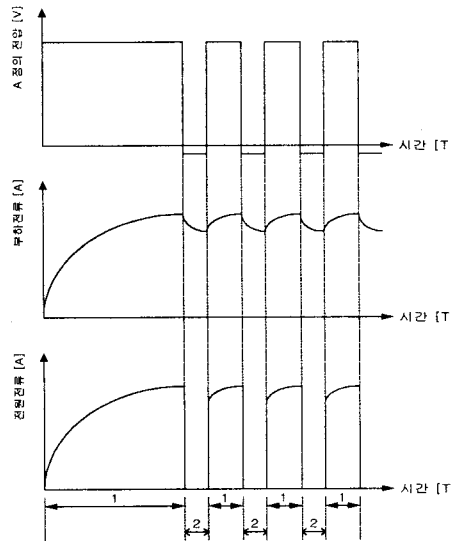


그림 4 PWM 구동의 기본 원리 파형

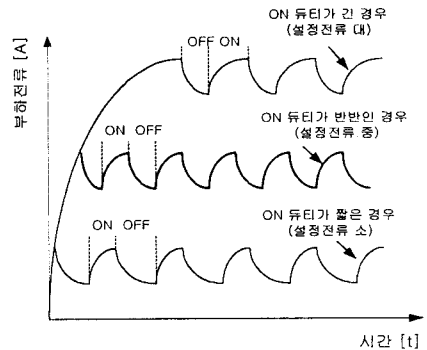


그림 5 PWM 구동의 ON/OFF 듀티비

따라서, LOA에 인가되는 전원의 전류특성을 알아야 하며, 주파수 성분에서 주파수 성분만이 아닌 위상 성분도 이종으로 제어하여야 한다. 따라서 이러한 두 가지 특성을 고려하여 시뮬레이션 모델링을 하여야 한다.

3. 시뮬레이션

3.1 플랜트 모델링

식 (7)의 상태방정식으로부터 얻어진 블록선도를 그림 (6)과 같이 구성하였다. 그림 (6)에서는 동특성시 전기자 반작용 현상이 발생하는 문제점을 고려한 플랜트 모델링 블록도이다.^[2]

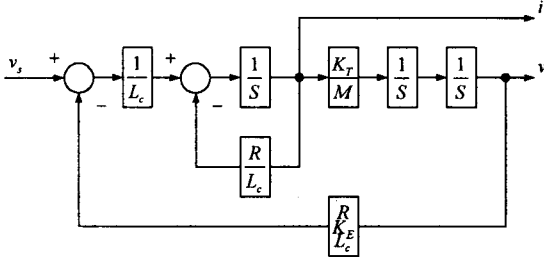


그림 6 플랜트 블록도

3.2 제어기 설계 및 모델링

플랜트에 걸리는 부하가 전기자 반작용 현상 및 전류의 크기에 따라 일정하지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 변위 및 전류를 피드백 하여 구성한 페루프 구동방식을 사용하였다. 또한 제어 알고리즘은 PI제어 방식을 사용하였으며, 식(9)는 시스템에 대한 PI제어 식으로써 가동자의 위치 및 스트로크, 전류 위상을 제어하는 식이다. r^p 는 가동자의 위치를 지령해 주는 변수이며, r^s 는 가동자의 스트로크 범위를 지령해 주는 변수이고 i^* 는 위상 딜레이 현상을 제어해 주는 지령전류 변수이다. 그림 (7)에서 PI#1, PI#2, PI#3는 PI제어기 부분이다.

$$u = \left(k_{pp} e_p + k_{ip} \int_0^t e_p dt \right) + \left(k_{ps} e_s + k_{is} \int_0^t e_s dt \right) + \left(k_{pi} e_i + k_{ii} \int_0^t e_i dt \right) \quad (9)$$

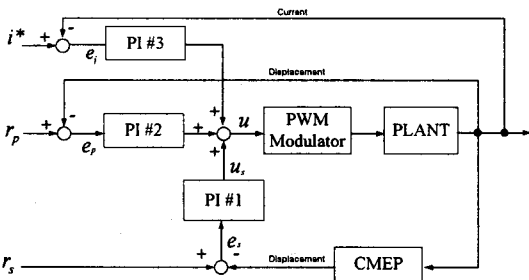


그림 7 제어기 블록도

그림 7은 스트로크 및 위치제어 그리고 전류제어 시스템 블록도를 나타내고 있다.

3.3 시뮬레이션

그림 (8)과 (9)는 전류 제어를 하지 않았을 때의 파형이다. 그림 (8)은 1Hz에서 구동했을 때의 파형으로 전압, 전류, 변위의 위상차가 심하지 않다. 그러나 그림 (9)의 그림은 10Hz에서 구동했을 때의 파형으로 전압, 전류, 변위의 위상차가 많이 발생함을 알 수 있다. 위상차가 많이 발생하는 원인은 높은 주파수에서는 코일에 걸리는

전압 대역폭이 좁기 때문에 가동체를 이동할 전류가 코일에 완전히 입력되기도 전에 방향이 바뀌기 때문에 완전한 전류를 흘릴수가 없는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 고주파수에서는 주파수에 비례하는 전압을 높여 더욱 많은 전류를 흘리면 위상차를 줄일 수 있다. 또한 전류신호를 입력받아 지령값에 추종하도록 제어기를 설계하여 위상 딜레이를 해결할 수 있다.

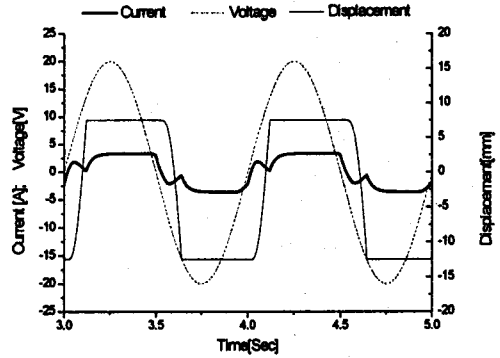


그림 8 1[Hz]로 구동했을 때의 전압, 전류, 변위파형

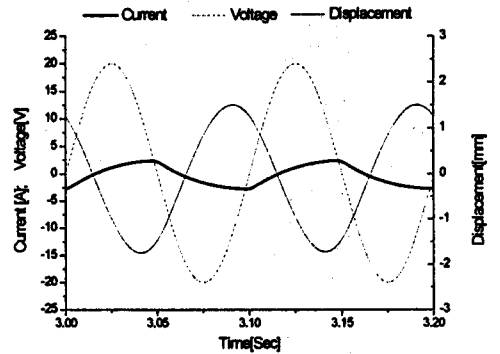


그림 9 10[Hz]로 구동했을 때의 전압, 전류, 변위파형

4. 결론

변위신호를 피드백 하여 위치제어 및 스트로크 제어를 시뮬레이션을 통하여 구성하였으며, 전류신호를 입력받아 기본주파수 및 위상차를 판별하여 높은 주파수대로 올라갈 경우에 발생하는 위상 딜레이 현상을 극복할 수 있는 알고리즘 및 시뮬레이션 모델링을 연구, 제안하였다. 이러한 시뮬레이션 및 모델링을 통하여 기계적 스프링이 없이, 즉 요구하는 위치와 스트로크로 왕복운동을 할 수 있고, 위상 딜레이 현상을 줄여가면서 구동할 수 있는 PI 제어알고리즘을 제안하였다. 전류 제어를 구성하지 않은 제안된 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션을 구성한 후 위상딜레이의 문제점을 확인하였다. 앞으로의 연구과제는 제안된 전류제어 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 모델링을 완성하여 알고리즘을 검증한 후 구동 드라이버를 제작하는 문제가 남아있다.

[참고 문헌]

- [1] 장석명 외, "리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액츄에이터의 설계제작 및 제어정수 도출", 전기학회 논문지, 제 48B권 제 5호, pp241-248, 1999
- [2] 장석명 외, "구동방식에 따른 가동코일형 LOA 동특성" 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2000.7