

Springless LOA를 이용한 스트로크 및 포지션 제어

장석명, 권철, 정상섭, 이성래
충남대학교

Stroke and Position Control for Springless LOA

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

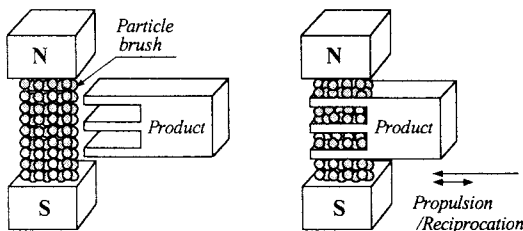
Abstract - The unbalanced reciprocation force due to armature reaction field decreases the advantage of moving coil linear motor, such as a high degree of linearity and controllability in the force and motion control. This paper firstly describes the coil inductance, and the unbalanced force. Secondly, the dynamic simulation algorithm considering the armature reaction effect and variable inductance is proposed. Thirdly, the control algorithm is proposed to reciprocate a load without mechanical spring at the required stroke and position. Finally, the validity of the proposed algorithm is confirmed by experiments.

1. 서 론

가동코일형 LOA의 발생력은 로렌쯔 법칙에 따라 영구자석에 의한 공극자속밀도와 가동코일인 전기자 전류의 곱으로 표현된다. 그러나 코일전류에 의한 자계가 공극자속밀도의 減磁/增磁 현상을 발생시켜 왕복 추력의 불균형을 가져온다. 이를 'push/pull 효과'라 부르는데, 전기자 전류의 방향과 크기 및 가동코일 위치에 따라 다르며, 영구자석보다 가동코일의 길이가 긴 長 코일형의 경우에 이러한 효과는 크다[1,2].

본 논문에서는 기계적인 스프링을 갖지 않는 가동코일형 LOA의 평형 왕복운동을 위해 PI 제어를 갖는 구동시스템을 제안하였다[3]. 가동자는 요구하는 위치와 스트로크로 구동되도록 제어되는데, 이러한 운동은 그림 1과 같은 연마 공정의 입자 브러시에 필요하며 기타 시스템에 적용 가능하다.

따라서 제안된 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 동특성 시뮬레이션을 수행하였으며 제어기와 구동기를 제작하였다. 그리고 주파수에 따라 제어 특성 실험을 수행한 결과 스프링 없이 원하는 위치에서 원하는 스트로크로 정밀히 제어됨을 확인할 수 있었다.



(a) 연마 전단계 (b) 연마 단계

그림 1 추진 및 왕복운동이 요구되는 입자 브러시

2. 가동코일형 리니어 모터

2.1 가동코일형 LOA 모델

가동코일형 LOA는 그림 2와 같이 영구자석에 의한 고정자와 플라스틱 보빈에 코일을 감은 가동자로 구성된다. 그리고 코일에 정현파 또는 구형파의 교번전류를 인가하면 가동자는 일정 스트로크로 고속 왕복운동을 하게된다. 만일 가동자가 x 방향으로만 운동한다면 가동자에 작용하는 추력은 식(1)과 같다.

$$F_x = 2INB_g i = k_T i [N] \quad (1)$$

여기서 I , N 는 각각 공극자계속에 있는 가동코일의 축방향 유효길이와 유효 권선수를 나타낸다. 또한 B_g 는 영구자석에 의한 공극자속밀도, i 는 가동자 코일에 흐르는 전류, k_E 는 추력 상수이다.

가동코일형 LOA의 기준좌표 및 가동코일의 위치 정의는 그림 3과 같다.

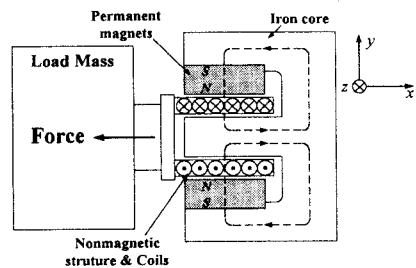


그림 2 가동코일형 LOA

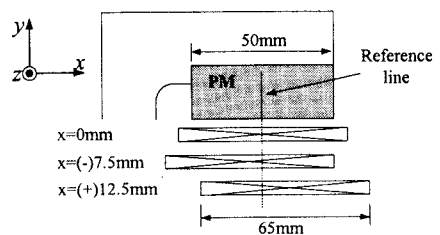


그림 3 기준좌표 및 가동코일의 위치 정의

2.2 운동 및 전압 방정식

가동코일형 LOA의 운동방정식은 식(2)와 같다.

$$M\ddot{x} = k_T i - C_d \dot{x} \quad (2)$$

여기서 M : 가동부 질량, C_d : 마찰계수, d^2x/dt^2 : 가동자

가속도이다. 또한 전류코일에 있어서의 전압방정식은 식(3)과 같다.

$$e = R\dot{i} + L_c \frac{di}{dt} + k_E \dot{x} \quad (3)$$

여기서 R , L_c , dx/dt 는 각각 코일저항, 코일 인덕턴스, 가동자의 속도이다. 운동방정식과 전압방정식을 상태방정식으로 나열하면 식 (4)와 같다.

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

2.3 가동자 위치와 push/pull 효과를 고려한 추력상수

LOA의 push/pull 효과를 고려하여 시스템을 모델링하기 위해서는 식 (1)은 식(5)와 같이 수정된다.

$$F_x = 2IN(B_g + \Delta B) i \quad (5)$$

여기서 ΔB 는 전기자 코일에 의한 공극자속밀도의 변화량으로 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Delta B(i, x) =$$

$$\frac{\mu_0 Ni}{l_m} \left\{ \frac{l_m + 2x}{2g_c} + \frac{1}{\pi} \ln \left(1 + \frac{\pi(l_c - l_m - 2x)}{2g_c} \right) \right\} \quad (6)$$

여기서 l_m , l_c 은 각각 영구자석과 가동코일의 길이, x : 가동 코일의 위치로 가동코일의 중심이 영구자석의 중심에 있을 때를 $x = 0$ 으로 정의한다. 따라서 추력상수 k_T 는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$k_T = 2IN[B_g + \Delta B(i, x)] \quad (7)$$

결과적으로 추력 상수는 가동코일에 입력되는 전류의 크기와 방향, 그리고 가동자 위치의 함수임을 알 수 있다.

2.4 LOA 플랜트 모델링과 제어정수

표 1은 실험에 의해 계산 및 측정된 제어정수를 보여주고 있다. 유기기전력 상수와 코일 인덕턴스는 가동자 위치에 따라 가변되기 때문에 모델링과 제어를 설계할 경우 이러한 제어조건을 만족시켜야 한다.

표 1 제어 정수

항 목	값	
유기기전력 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]	

그림 4는 식(4)를 바탕으로 블록도를 구성하였다. LOA는 가동자 변위에 따라 추력 및 유기전압 상수가 다르다. 따라서 각 변위에 따른 유기전압 상수를 입력해야 하며, 가동자와 부하가 리니어 베어링으로 지지되어 있어 마찰력이 존재하지만 마찰계수가 그다지 크지 않아 마찰계수를 고려하지 않았다. 또한 LOA의 최대 이동 변위는 (-)12.5[mm]부터 (+)7.5[mm]까지로 제한되어 있다.

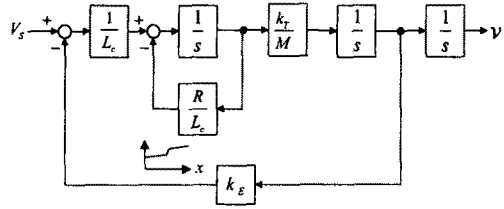


그림 4 LOA 블록다이어그램

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 제어기 설계

플랜트에 걸리는 부하가 일정하지 않으며, 시스템의 응답특성이 중요한 시스템이기 때문에 펄스폭 구동방식을 사용하였다. 제어 알고리즘은 PI제어 방식을 사용하였으며, 식(8)은 시스템에 대한 PI제어 식이다. 여기서 k_{pd} , k_{id} 는 PI#2에 사용되어지는 비례이득과 적분이득이며, k_{px} , k_{ix} 는 PI#1에 사용되어지는 비례이득과 적분이득으로 구성되어져 있다.

$$u = \left(k_{pd} e_d + k_{id} \int_0^t e_d dt \right) + \left(k_{px} e_x + k_{ix} \int_0^t e_x dt \right) \quad (8)$$

그림 5는 스트로크 및 위치제어 시스템 블록도를 나타내고 있다. 모터구동 전원으로는 PWM 구동방식을 사용하였으며, 불평형 왕복 추력과 가동코일에 발생되어지는 인덕턴스의 변화를 플랜트 블록에 첨가하였다. CMEP(Calculation of mean in each point)제어알고리즘 블록은 한 포인트마다 오차를 계산하여 위치를 추종하는 알고리즘이며, PI#2는 앞으로 들어올 기준신호입력과 현재 출력되어지는 신호를 비교하여 오차를 계산하는 방식으로 구성되어졌다. 또한 r_d 신호는 스트로크 제어 신호로써 사용되어진다.

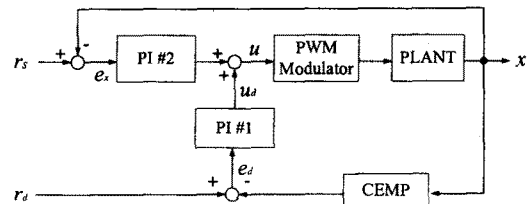


그림 5 스트로크 및 위치제어 시스템 블록도

3.2 시뮬레이션

제한된 제어알고리즘을 사용하여 주파수, 위치, 스트로크 범위에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6은 주파수 5[Hz], 왕복운동의 중심인 구동위치 0[mm], 스트로크 범위±3[mm]로 구동시킨 결과이다. 그림 7은 그림 6과 동일 조건에서 구동위치가 -3[mm]인 경우이다. 그림에서 보듯이 제어하고자 하는 위치와 스트로크 범위가 안정적인 응답함을 알 수 있었다. 여기서 출력전압의 파형이 구형파에 가까운 것은 입력 주파수에 응답하기 위해서는 가동체 질량의 무게를 극복할 수 있는 전압이 들어와야 하기 때문이다. 따라서 이러한 시스템은 구형파에 가까운 전원을 사용하여 입력되어지는 전류를 제어하여야만 원하는 응답특성을 얻을 수 있었다.

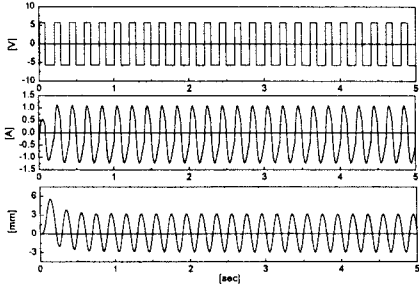


그림 6 시뮬레이션 결과(5Hz)
(구동위치 : 0 mm, 스트로크 ± 3 mm)

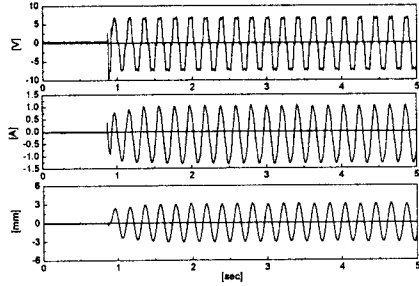


그림 9 제어 특성 실험 결과(5Hz)
(구동위치 : 0 mm, 스트로크 ± 3 mm)

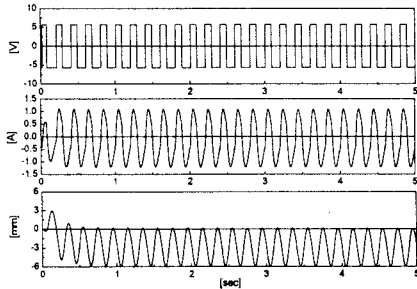


그림 7 시뮬레이션 결과(5Hz)
(구동위치 : -3 mm, 스트로크 ± 3 mm)

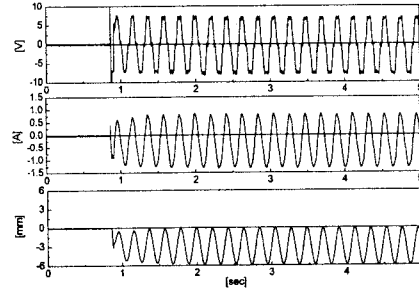


그림 10 제어 특성 실험 결과(5Hz)
(구동위치 : -3 mm, 스트로크 ± 3 mm)

3.3 제어 특성 실험

그림 8은 LOA 및 구동 드라이버로써 전체시스템을 제어하기 위한 16bit마이크로 프로세서인 80C196KC를 사용하였으며, 제어알고리즘은 식(8)을 통해 구현하였다.

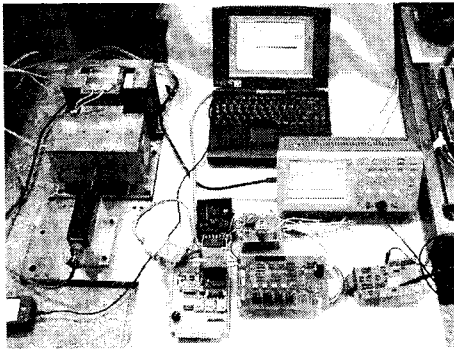


그림 8 전체 시스템 구성도

제어 시스템은 크게 세가지로 구성되어 있는데 기준 입력신호를 보내주는 D/A Converter, 기준입력신호를 구동신호로 변조해 주는 PWM변조부 및 Power driver부, 제어기와 플랜트 사이의 절연을 위한 목적으로 설치된 포토커플러부 및 plant의 위치를 센싱하는 LVDT센서, 센서신호를 디지털 신호로 변환해 주는 A/D Converter부로 구성되어있다. 그림 9는 주파수 5[Hz], 구동위치 0[mm], 스트로크 범위 ± 3 [mm]이며, 그림 10은 주파수 5[Hz], 구동위치 -3[mm], 스트로크 범위 ± 3 [mm]로 구동한 실험 데이터로써 시뮬레이션과 동일하게 안정적인 응답특성을 얻었다

4. 결 론

불평형 왕복추력과 가동코일에 발생되어지는 인덕턴스의 변화는 추력과 위치제어에 선형성과 제어성능에 큰 영향을 끼친다. 따라서 이러한 현상을 극복하면서 제어를 수행하여야만 안정적으로 응답을 얻을 수 있다. 따라서 전기자 반작용효과를 고려한 리니어 모터의 동적 시뮬레이션 알고리즘과 가변 인덕턴스 현상을 모델링하였다. 이러한 모델링을 통하여 기계적 스프링이 없이, 즉 요구하는 위치와 스트로크로 왕복운동을 할 수 있도록 PI 제어알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증되었으며 요구하는 위치 및 스트로크 제어 성능을 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 장석명 외, "영구자석 계자와 전기자 자속의 상호작용효과를 고려한 가동코일형 리니어모터의 정특성", 전기학회 논문지 48B권 1호, pp19~26, 1999. 1
- [2] 장석명 외, "리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액츄에이터의 설계제작 및 제어정수 도출", 전기학회 논문지, 제 48B권 제 5호, pp241-248, 1999
- [3] 이우선 외, "i80196kc 구조 및 응용 모터자동제어", ohm사, 1995,5