

Push/pull 효과를 고려한 Springless LOA 구동드라이버 개발

장석명, 권철, 정상섭, 성소영  
충남대 전기공학과

Springless LOA Driver Development with Consideration of Push/pull effect

S.M. Jang, C. Kweon\*, S.S. Jeong, S.Y. Sung  
Chung-Nam National Univ.

**Abstract** - A moving-coil-type linear oscillatory actuator(LOA) consists of the NdFeB permanent magnets with high specific energy as the stator, a coil-wrapped nonmagnetic hollow rectangular structure. LOA system have the push/pull effect caused by the unbalanced magnetic field. In order to eliminate the unbalanced thrust, we propose the control algorithm and construct the LOA driver. As a results, we obtain the balanced oscillating thrust.

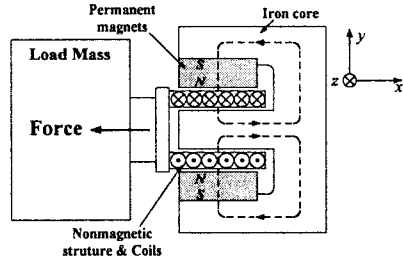


그림 1 가동코일형 LOA

1. 서 론

가동코일형 LOA의 발생력은 로렌쯔 법칙에 따라 영구 자석에 의한 공극자속밀도와 가동코일인 전기자 전류의 곱으로 표현된다. 그러나 코일전류에 의한 자체가 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[1,2,3].

본 논문에서는 가동코일형 LOA의 자기적인 불평형으로 발생하는 Push/pull 현상을 보완하기 위해 구동부를 포함한 PI제어 시뮬레이션 알고리즘을 구성하여 제어특성을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 Push/pull 현상을 보완해주는 응답특성을 얻을 수 있었으며 이를 토대로 구동 및 제어 시스템을 직접 제작하여 LOA를 제어한 결과 시뮬레이션 값과 거의 유사한 결과를 얻었다. 따라서, 이를 토대로 전기자 코일 자속에 의한 추력의 비대칭 현상, 즉 Push/pull 효과를 보완할 수 있는 구동 시스템을 확립하였고 정밀 위치제어를 실현할 수 있었다.

2. 가동코일형 LOA와 상태방정식

2.1 가동코일형 LOA 모델

가동코일형 LOA는 그림 1과 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  $l$ ,  $N$ 은 각각 공극자속에 있는 가동코일의 축방향 유효길이와 유효 권선수를 나타낸다. 또한  $B_g$ 는 영구자석에 의한 공극자속밀도,  $i$ 는 가동자 코일에 흐르는 전류,  $k_T$ 는 추력 상수이다.

2.2 운동 및 전압 방정식

가동코일형 LOA의 운동방정식은 식(2)와 같다.

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

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

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

여기서  $R$ ,  $L$ ,  $dx/dt$ 는 각각 코일저항, 코일 인덕턴스, 가동자의 속도이다.

2.3 가동자 위치와 push/pull 효과를 고려한 추력 상수

LOA의 push/pull 효과를 고려하여 시스템을 모델링하기 위해서는 식 (1)은 식(4)와 같이 수정된다.

$$F_x = 2IN(B_g + \Delta B) i \quad (4)$$

여기서  $\Delta B$ 는 전기자 코일에 의한 공극자속밀도의 변화량으로 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\Delta B(i, x) = \frac{\mu_0 Ni}{l_m} \left\{ \frac{l_m + 2x}{2g_c} + \frac{1}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{\pi(l_c - l_m - 2x)}{2g_c} \right) \right\} \quad (5)$$

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 추력 상수  $k_T$ 는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$k_T = 2IN[B_g + \Delta B(i, x)] \quad (6)$$

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

### 3. 제어기 설계 및 시뮬레이션

#### 3.1 제어기 설계

Push/pull 현상을 극복하기 위해 PI제어기를 적용하였는데, 위치신호를 입력받아서 한 주기의 평균값을 구하여 평균값이 0이 되도록 함으로써 가동자 편심현상을 없앨 수 있었다. 이를 위한 제어식은 식 (7)과 같다.

$$u = r \sin(t) + K_p d_m + K_i \int_0^T d_m dt \quad (7)$$

여기서  $r$ 은 기준입력의 크기,  $d_m$ 은 변위 신호에 대한 한 주기의 평균,  $K_p$ ,  $K_i$ 는 각각 이득 값을 나타낸다. 이러한 제어 시스템의 블록도를 그림 2와 같이 표현하였다. 그림 2의 블록도는 구동신호를 발생해 주는 구동부, push/pull 현상을 갖는 LOA 시스템을 모델링한 plant부, 그리고 PI 제어부로 시뮬레이션 알고리즘을 구성하였다.

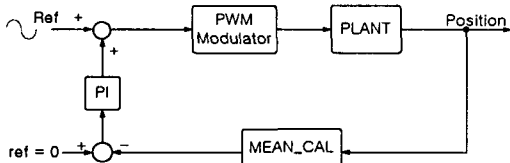


그림 2 시뮬레이션 블록다이어그램

#### 3.2 위치제어 알고리즘

LOA는 위치제어 알고리즘을 사용하였으며, 제어 동작은 입력에 의해 영향을 받는 요소의 출력변화를 말하는데 출력도 제어요소에 의한 제어변수  $U(t)$ 에 의하여 여러 가지 특성을 갖게된다. 따라서 제어요소에 의한 보완은 시스템의 정상상태 오차 및 외란 등에 의한 특성을 개선하기 위해 사용된다. 연속치 비례적분 제어기 전달함수는 각 제어의 합으로 식 (8)과 같이 표현된다.

$$G_c = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left( 1 + \frac{K_i}{K_p s} \right) \quad (8)$$

오차  $e(t)$ 에 의하여 동작하는 비례적분 제어기는 식 (9)와 같다.

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt = e_1 + e_2 \quad (9)$$

비례적분 제어기는 목표값에서 피드백 양을 뺀 오차와 비례제어 요소와 오차의 적분값에 비례한 적분제어요소로 이루어져 있다. 그림 3은 프로그램을 구성하기 위한 흐름도로 한 주기의 평균값을 구하여 한 주기의 평균값이 0이 되도록 추종하는 프로그램 구성도를 보여주고 있다.

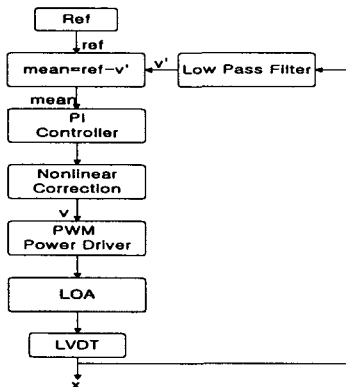
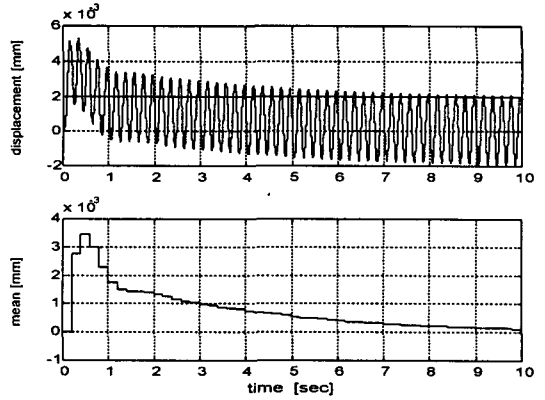


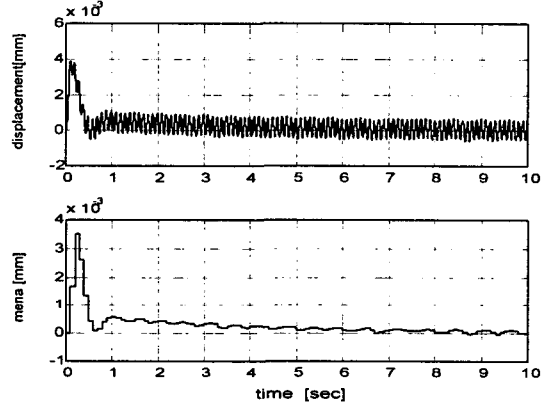
그림 3 제어기 플로우 차트

#### 3.3 시뮬레이션 결과

그림 4는 구동 전원전압을 20V로 구동하였을 경우 변위에 대한 응답특성과 평균값을 보이고 있다. 그림 4(a)(b)에서 push/pull 현상을 보완하면서 정상상태 까지 도달하는 시간은 10초, 7초 정도 소요됨을 알 수 있다.



(a) 5Hz, 20V로 구동하였을 때



(b) 10Hz, 20V로 구동하였을 때

그림 4 LOA 제어 시스템의 시뮬레이션 결과

### 4. 제어기 구성 및 실험

#### 4.1 구동 및 제어시스템의 구성

제어시스템은 그림 5와 같이 전체시스템을 제어하기 위한 16bit마이크로 프로세서인 80C196KC와 프로그램으로 구현한 비례적분제어기 및 주파수변환부, 기준입력신호를 보내주는 D/A Converter, 기준입력신호를 구동신호로 변조해 주는 PWM변조부 및 Power driver부, 제어기와 플랜트 사이의 절연을 위한 목적으로 설치된 포토커플러부가 있으며 plant의 위치를 센싱하는 LVDT센서, 센서신호를 디지털 신호로 변환해 주는 A/D Converter부로 구성되어있다.

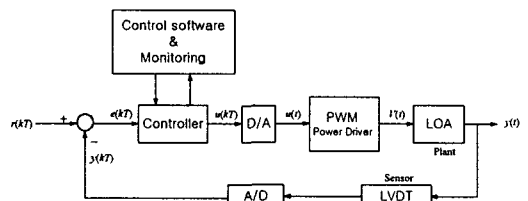


그림 5 제어 시스템 구성

제어기에서는 노이즈에 민감한 아날로그 소자 대신 제어기 내부에 장착된 A/D Converter를 사용하여 소프트웨어적으로 처리함으로써 노이즈 문제를 저감하였다. 비례적분 제어기를 기존의 연산증폭기를 사용하여 구성을 할 경우 연산증폭기 자체가 외부 온도 및 열화, 전원 변동에 의해서 입력, 오프셋전압, 입력 바이어스전압 그리고 입력 offset 전류가 변화해 가는 온도 드리프트가 존재하여 드리프트 회로가 필수적이다. 그러나 제어기 자체를 프로그램 화 함으로써 제어기의 신뢰도가 향상되었다. 그림 6은 LOA 페루프 시스템 구성도를 보여주고 있다.

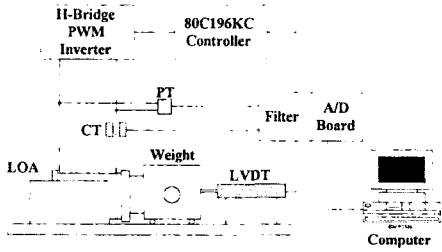
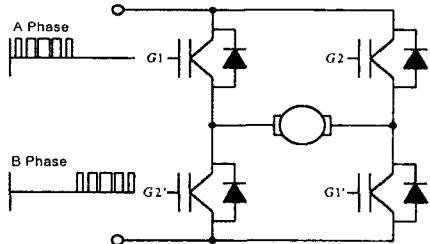
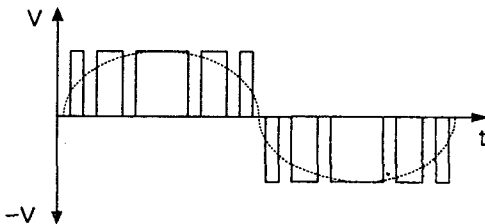


그림 6 전체 시스템 구성도

그림 7은 구동전원 소스전압을 생성하는 초퍼제어부와 출력 파형을 보인다. 접합형 트랜지스터(FET)에 의한 펄스 폭 변조방식을 썼으며 콘트롤러에서 인가되어지는 펄스 폭 변조출력은 A, B상 구동소자 파형을 생성하여 A상은 G1, G1'의 게이트를 동시에 ON 시키고 B상은 G2, G2'의 게이트를 동시에 ON 시키는 방법으로 동작하게 된다. PWM 제어방식은 모터에 인가되는 단자전압의 평균치를 제어한다.



(a) 게이트 드라이버

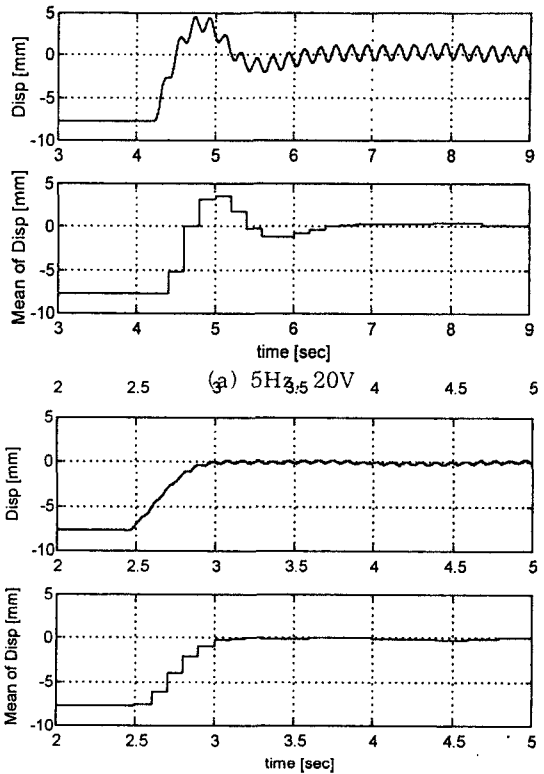


(b) 출력 파형

그림 7 PWM 구동 시스템

#### 4.2 실험 결과

그림 8은 PI 제어기를 포함한 PWM 구동드라이버를 제작하여 실험한 결과이다. 그림 8의 변위 파형에서 보듯이 push/pull 현상을 보완하면서  $x=0$ 의 위치에서 왕복 구동됨을 확인할 수 있었다.



(a) 5Hz, 20V  
(b) 10Hz, 20V  
그림 8. 제어 실험 결과

## 5. 결론

본 연구에서는 Push/pull 현상을 보완하기 위해 비례적분 제어기법에 의한 위치제어 시스템을 구성하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- LOA의 전자기 불평형에 의한 Push/pull 현상을 변위신호에 대한 한 주기에 대한 평균값을 구하여 평균값이 0이 되도록 추종하는 형태로 비례적분 제어법을 통하여 위치제어를 할과 동시에 Push/pull 현상을 보완할 수 있었다.
- 정확한 제어특성을 갖는 서보 액추에이터로써 스프링 없이 구동함에 따라 가·감속 및 정지 운동을 빠른 속도로 반복하므로, 속응성 및 제어성이 뛰어난 성능을 발휘할 수 있었다.

### [참고 문헌]

- [1] 장석명 외 "연구자석 제자와 전기자 자속의 상호작용 효과를 고려한 가동코일형 리니어모터의 정특성", 전기학회 논문지 48B권 1호, pp19~26, 1999. 1
- [2] 장석명 외 "능동 진동제어 시스템에의 보이스코일형 LOA응용", 전기학회 논문지, 제 46권 제6호, pp. 862-868, 1997.6
- [3] 장석명 외 "리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액추에이터의 설계제작 및 제어정수 도출", 전기학회 논문지, 제 48B권 제 5호, pp241-248, 1999.