

# 가동자 위치에 따른 인덕턴스 변화와 Push/pull 효과를 고려한 가동코일형 LOA의 동특성

論 文  
50B-7-1

## Dynamic Characteristics of Moving Coil Linear Oscillatory Actuator Considering the Variable Inductance and Push/pull Effects

鄭 相 燮\* · 張 錫 明\*\*

(Sang-Sub Jeong · Seok-Myeong Jang)

**Abstract** - A moving coil linear oscillatory actuator is consisted of the NdFeB permanent magnets with high specific energy as the stator, a coil-wrapped nonmagnetic hollow rectangular structure and an iron core as a pathway for magnetic flux. The variation of mover position and the consequent changes of coil flux path affect the coil inductance, because coil flux leaks at the open region of LOA stator. The interaction between permanent magnet and armature field is to shift the airgap flux density variation due to the magnet alone by a certain amount. The unbalanced reciprocation force due to armature reaction field decreases the advantage of moving coil LOA, such as a high degree of linearity and controllability in the force and motion control. This paper firstly describes the coil inductance, the deviation of flux density, and the unbalanced reciprocation force, which are derived from the permeance model of LOA. Secondly, the analytical method are verified using the 2D finite element method and tests. Finally, the dynamic simulation algorithm taking the armature reaction effect and variable inductance into account, is proposed and confirmed through the experiment.

**Key Words** : moving coil LOA, variable inductance, armature reaction, push/pull effect

### 1. 서 론

가동코일형 리니어 왕복 액츄에이터(linear oscillatory actuator ; 이하 LOA)는 NdFeB 영구자석 계자를 갖는 자기 회로와 보빈 및 가동코일로 이루어지며, 리니어 왕복운동을 위한 추진력 발생장치이다[1,2]. 기존의 유압식 구동시스템이나 회전형 모터를 이용한 방식에 비하여 명령신호에 의하여 입력되는 주파수, 전압, 전류 등에 대한 동작의 선형성 및 제어성에서 매우 뛰어난 특성을 가질 뿐 만 아니라, 구조가 간단하고 부품수가 작아 시스템의 소형경량화가 가능하고, 생산이나 유지보수 등의 경제적 측면에서 매우 유리한 액츄에이터이다[1,2].

일반적으로 전기기기에서 권선 인덕턴스는 제어시스템 설계에 있어서 중요한 파라미터이다. 특히 서보 액츄에이터로써 사용하기 위한 가동코일형 LOA는 가/감속 및 정지 동작을 빈번하게 반복하므로, 발생 추력은 물론 과도상태에서의 제어정수는 매우 중요한 의미를 갖는다. 따라서 가동코일형 LOA의 경우 속응성이 양호하도록 시정수를 작게 하기 위하여 쇼트링 등을 이용하여 인덕턴스를 작게 한다[2, 3].

한편, 가동코일형 LOA의 발생력은 로렌츠 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[2,4]. 따라서 정밀한 제어 특성이 요구되는 구동력 발생 장치에 응용하는 경우, 설계 단계에서는 전기자 전류 자계에 의한 영구자석의 퍼미언스 계수 저하로 발생하는 잔류자속밀도 감소, 모터 해석과 운전 제어에서는 push/pull 효과로 인한 추력 변화 등을 고려해야만 한다.

저자들은 가동코일형 LOA의 정특성을 해석하고 시험하여 push/pull 효과를 포함한 응용의 기본자료를 얻어 이미 제시한 바가 있으며[5], 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 시스템의 구동력발생장치로 응용한 예도 있다[6]. 그리고 설계법을 확립하고 과도상태를 포함한 운전특성의 정밀한 파악을 위해 저항, 인덕턴스, 시정수 등의 제정수를 산정하여 시스템의 전달함수를 도출한 바도 있으며[7], 유기전압 및 추력상수를 정밀 산정하여 동특성 시뮬레이션 알고리즘을 구성하고 이를 통해 동특성을 검토한 바도 있다[8].

그러나 본 연구 모델과 같이 개방형 자기회로를 갖는 가동코일형 LOA의 경우 불평형 자계 에너지 분포로 인하여 가동자 위치에 따라 인덕턴스는 왕복 가능 영역안에서 2배 정도 차이가 발생하였다[7]. 또한 push/pull 효과에 의한 왕복 불평형 추력은 정격 전류에서 약 50N, 즉 정격 추력의 18% 정도가 발생하였으며 가동자의 왕복 가능 영역내에서는 약 20N 정도의 차이가 발생한다[5]. 그런데 가동자 위치

\* 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 博士課程 修了

\*\* 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 6月 5日

最終完了 : 2001年 6月 5日

에 따른 인덕턴스 변화에 대한 연구는 물론 push/pull 효과에 의한 불평형 추력을 고려한 LOA의 동특성에 대한 연구도 수행된 바가 없다.

본 논문에서는 설계·제작된 가동코일형 LOA의 가동자 위치에 따른 퍼미언스 모델을 통해 가동코일의 인덕턴스 변화와 push/pull 효과를 고려한 특성식을 도출하였다[3,9,10]. 또한 이 결과를 FEM 해석 결과와 비교하였으며 동특성 시뮬레이션과 실험을 수행함으로써 그 영향을 평가할 수 있었다. 즉,

- (1) 개방된 자기회로에 의해 프린징 자속을 갖는 LOA의 자기회로에서 가동코일 위치에 따른 퍼미언스 모델을 구성하였다. 그리고 이를 통해 가동코일의 인덕턴스와 push/pull 효과에 따른 공극자속밀도와 추력 변화에 대한 특성식을 유도하였다.
- (2) 유도된 특성식의 타당성을 검증하기 위해 가동코일 위치에 따른 인덕턴스 및 공극자속밀도와 추력 변화량을 2차원 유한요소 해석 결과와 비교하였다.
- (3) 가동자 위치에 따른 인덕턴스 변화와 push/pull 효과를 고려하여 동특성 알고리즘을 구성하였다. 그리고 이를 고려하지 않은 경우의 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 그 영향을 평가하였으며, 동특성 실험 결과를 통해 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

## 2. 가동코일형 LOA의 퍼미언스 모델

### 2.1 가동코일형 LOA와 push/pull 효과

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 공극자계속에 있는 가동코일의 축방향 유효길이와 유효 권선수를 나타낸다. 또한  $B_g$ 는 영구자석에 의한 공극자속밀도,  $i$ 는 가동자 코일에 흐르는 전류,  $k_T$ 는 추력 상수로 유기전압 상수와 동일하다.

그러나 실제 전기자 전류에 의한 자속의 영향은 추력 및 유기전압 상수에 영향을 준다. 즉, 코일 전류가 입력되지 않을 때 운전점 자속밀도는 그림 2의 감자곡선에서 'O'점에 해당되며, 이 점은 자기회로의 퍼미언스에 의해 결정된다. 그런데 코일 전류가 입력될 경우에는 전류 방향에 따라 공극자속밀도의 減磁/增磁 현상을 발생시켜 'P' 또는 'Q'점에서 운전하게 된다. 'P'점일 때를 push 효과, 'Q'점일 때를 pull 효과라 하며, LOA가 왕복운동을 할 경우 운전점 자속밀도는 'P'점과 'Q'점 사이를 왕복 이동한다.

### 2.2 개방 자기회로를 갖는 가동코일형 LOA의 퍼미언스 모델

코일 전류에 의해 발생된 자속은 그림 3과 같이 공극을 지나자속  $\Phi_g$ 과 개방된 영역을 따라 외부로 흐르는 자속

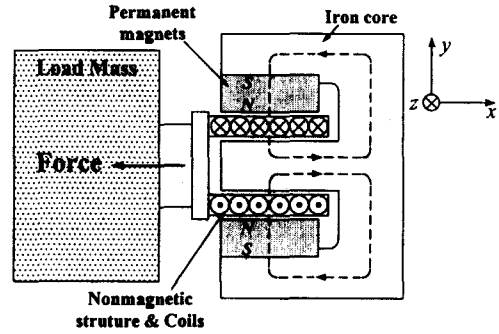


그림 1 가동코일형 리니어 왕복 액츄에이터  
Fig. 1 Moving coil type linear oscillatory actuator

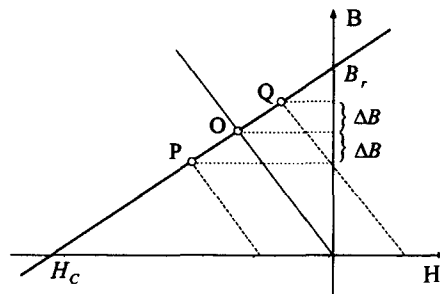


그림 2 감자곡선과 운전점 자속밀도  
Fig. 2 Demagnetization curve & operating points

$\Phi_l$ 로 분리된다. 코일길이  $l_c$ 가 영구자석 길이  $l_m$ 보다 짧은 短코일형의 경우에는 영구자석 길이내에서 왕복운동을 하기 때문에 추력을 발생시키는 자속은  $\Phi_g$ 만을 고려하면 된다. 그러나 본 연구모델과 같이 코일길이가 영구자석보다 긴 長코일형인 경우에는  $\Phi_l$ 도 추력에 영향을 주기 때문에 이를 고려하여 쇄교자속을 결정해야 한다. 특히 코일 전류에 의한 push/pull 효과는 개방된 자기회로쪽이 비교적 크므로 반드시 이를 고려해야 한다[5].

코일 전류에 의한 발생자속  $\Phi_c$ 는 식 (2)와 같다.

$$\Phi_c = NI(P_g + P_l) \quad (2)$$

여기서  $N$ : 코일 턴수,  $I$ : 입력 전류,  $P_g$ : 공극 퍼미언스,  $P_l$ : 프린징에 의한 퍼미언스다. 만약, 철심의 자기저항을

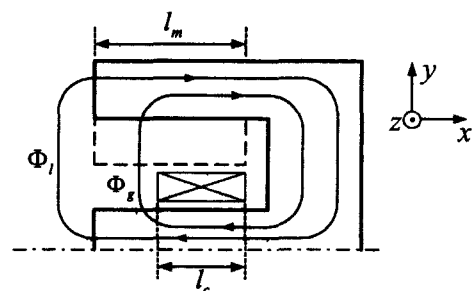


그림 3 코일 전류에 의한 자속 경로  
Fig. 3 Armature reaction flux paths

무시한다면 가동코일의 공극 페리먼스는 그림 4(a)의 모델을 통해 식 (3)과 같다.

$$P_g(x) = \frac{\mu_0 x_e L}{g_c} \quad (3)$$

여기서  $L$  : 그림 3에서  $z$  방향으로의 모터 길이,  $g_c$  : 코일에서 보는 공극 길이,  $x_e$  : 개방된 자기회로 끝에서 가동코일 중심까지의 거리로 식 (4)와 같다.

$$x_e = \frac{l_m}{2} + x \quad (4)$$

여기서  $l_m$  : 영구자석의 길이,  $x$  : 가동 코일의 위치로 가동코일의 중심이 영구자석의 중심에 있을 때를  $x=0$  으로 정의하며, 본 모델의 가동코일이 왕복운동할 수 있는 범위는  $x=-12.5 \sim 7.5$  [mm]이다[7,8].

한편, 프린징에 의한 페리먼스는 그림 4(b)를 통해 모델링하면 식 (5)와 같다.

$$P_l = \int_0^R \frac{\mu_0 dA}{l} = \frac{\mu_0 L}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi R}{g_c}\right) \quad (5)$$

여기서  $dA=Ldr$ ,  $l=g_c + \pi r$ 이며,  $R$  : 프린징 자속을 고려한 길이로 공극의 수배로 한다[10].

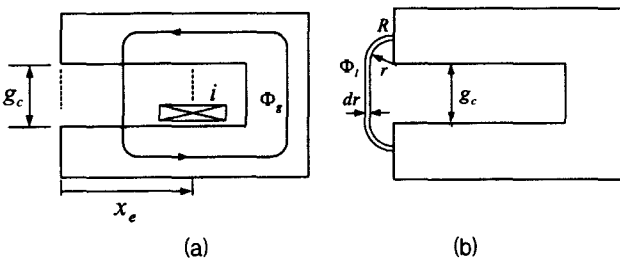


그림 4 공극 및 프린징에 의한 페리먼스 계산을 위한 모델  
Fig. 4 Airgap and fringing permeance model

### 2.3 가동자 위치에 따른 인덕턴스와 Push/pull 효과의 특성식

그림 3에서  $z$  방향의 누설을 고려하지 않는 2차원 해석의 경우 전체 페리먼스  $P$ 는 공극 페리먼스  $P_g$ 와 프린징에 의한 페리먼스  $P_l$ 의 합이다. 따라서 가동자 위치에 따른 코일 인덕턴스  $L_c$ 는 식(3)과 식(5)를 통해 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$L_c(x) = N^2 P = N^2 (P_g + P_l) = \mu_0 N^2 L \left\{ \frac{l_m + 2x}{2g_c} + \frac{1}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi R}{g_c}\right) \right\} \quad (6)$$

여기서  $N$ 는 코일 턴수이다.

또한, 코일 자계에 의한 공극자속밀도의 변화량은 구하기 위한 식 (5)의 적분 길이  $R$ 은 프린징 자속의 영향을 받는 가동코일 길이로 식 (7)과 같다.

$$R = \frac{l_c - l_m}{2} - x \quad (7)$$

여기서  $l_c$  : 가동코일의 길이이다. 따라서 그림 2에서의 push/pull 효과에 의한 공극자속밀도의 변화량  $\Delta B$ 는 식 (3)과 식 (5)를 통해 식 (8)과 같다.

$$\Delta B(x) = \frac{\Phi_g + \Phi_l}{l_m L} = \frac{\mu_0 NI}{l_m} \left\{ \frac{l_m + 2x}{2g_c} + \frac{1}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi(l_c - l_m - 2x)}{2g_c}\right) \right\} \quad (8)$$

그리고 공극자속밀도의 변화에 따른 추력의 변화량  $\Delta F$ 는 식 (1)과 식 (8)로부터 식 (9)와 같이 구한다.

$$\Delta F(x) = 2LN\Delta BI \quad (9)$$

결과적으로 push/pull 효과에 의한 추력의 변화량은 가동코일에 흐르는 전류와 가동자 위치의 함수임을 알 수 있다.

### 3. 가동자 위치에 따른 인덕턴스 특성과 Push/pull 효과

#### 3.1 가동코일형 LOA의 해석 모델

해석 및 시험에 사용된 가동코일형 LOA리니어모터는 구조물 진동의 능동 제어시스템에 응용한 것으로 해석을 위한 주요 사양은 표 1과 같다[5]. 또한 유한요소해석 및 실험, 시뮬레이션의 경우에 기준좌표 및 가동자 위치, 전류방향은 그림 5와 같이 정의한다. 가동자가 영구자석의 중심에 있을 때  $x=0$  [mm]로 정의하고, 가동자가 이동할 수 있는 범위는  $x=-12.5 \sim 7.5$  [mm]이다. 전류는 LOA의 위쪽 코일의 전류가 지면으로부터 나오는 방향을 양(+)으로 정의한다.

표 1 LOA 모델의 사양

Table 1 Specification of LOA model

항 목		값
공극 $g_c$		40 mm
코일	코일 길이 $l_c$	65 mm
	코일 높이 $t_c$	11 mm
자석 길이 $l_m$		50 mm
요크 높이 $t_y$		30 mm
코일 턴수 $N$		495 턴
모터 길이 $L$		150 mm

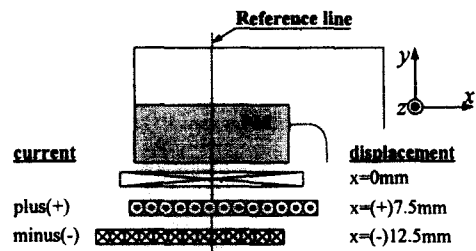


그림 5 가동자의 위치와 전류방향 정의

Fig. 5 Definition of mover position and current direction

3.2 가동자 위치에 따른 인덕턴스 특성

그림 6은 가동자가  $x=-10[\text{mm}]$ 와  $x=10[\text{mm}]$ 에 위치해 있을 때 유한요소해석에 의한 코일 전류에 의한 자속분포이다. 그림 6(a)와 같이 가동자가 (-)의 위치에 있을수록 프린징되는 자속은 많아지고 공극에서의 자속분포도 더 왜형된다.

그림 7은 가동자 위치에 따른 코일 인덕턴스로 실험 및 유한요소해석 결과와 식 (6)에 의한 해석결과를 비교한 것이다. 가동자 위치에 따른 인덕턴스는 모두 동일한 경향, 즉 가동자 위치가 (+)의 위치에 있을수록 인덕턴스가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 식 (6)에 의한 해석결과는 프린징 부분의 적분길이  $R$  를 공극길이의 2배의 경우에 2차원 유한요소해석 결과와 일치하였다. 또한 가동자 위치에 따른 인덕턴스 변화를 통해 가동코일형 LOA에서도 릴럭턴스 추력이 존재함을 예상할 수 있다.

3.3 가동자 위치에 따른 push/pull 효과

그림 8와 그림 9는 가동자 위치에 따른 push/pull 효과에 의한 공극자속밀도와 추력의 변화량을 보여주는데, 각각 식 (8)과 식 (9)에 의해 계산된 값과 2차원 유한요소 해석값을

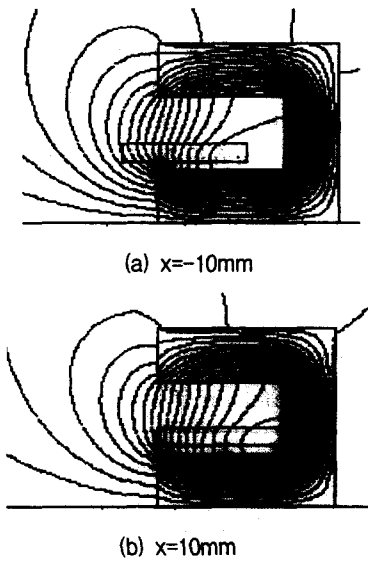


그림 6 가동코일 전류에 의한 자속 분포  
Fig. 6 Coil flux distribution

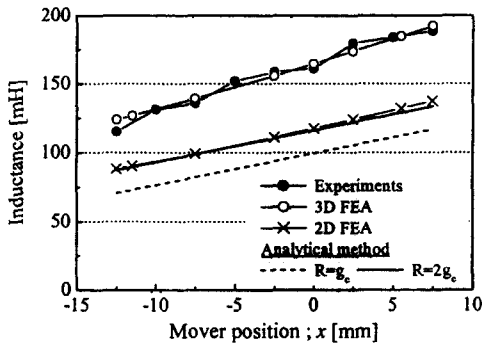


그림 7 가동자 위치에 따른 코일의 인덕턴스  
Fig. 7 Inductance vs. mover position

비교하였다. 그림 8에서 가동코일 영역내의 평균 공극자속 밀도의 변화는 가동자, 즉  $x$  가 커질수록 약간 증가하는 같은 경향을 가졌다. 그러나 이론적 해석 결과가 유한요소 해석결과보다 비교적 큰 값을 가졌다. 또한 그림 9에서는 추력의 변화량으로 유한요소해석 결과와 비교적 일치하는 특성을 갖는다.

4. 인덕턴스 변화와 push/pull 효과를 고려한 동특성

4.1 인덕턴스 변화를 고려한 동특성

LOA 시스템의 전압 및 운동방정식을 통해 그림 10과 같이 가동자 위치에 따른 인덕턴스의 변화를 고려한 시뮬레이션 블록도를 구성하였다[8]. 이 때 다음과 같은 가정을 두어 시뮬레이션을 수행하였다.

- ① LOA는 정현적인 전압원에 의해 구동되며, 가동자 위치에 따라 변화하는 코일 인덕턴스는 가동자 위치를 피드백 받아 모델링하였다. 코일 인덕턴스는 식 (6)과 표 1의 설계 사양을 적용하면 식 (10)과 같은 코일 위치에 따른 함수로써 표현되지만 이는 실제와 다르므로 3차원 해석결과를 근사화시켜 식 (11)로 모델링하였다.

$$L_a(x) = 2.31x + 0.116 \text{ [H]} \tag{10}$$

$$L_b(x) = 2.42x + 0.166 \text{ [H]} \tag{11}$$

- ② 인덕턴스 변화에 따른 동특성만을 비교하기 위해 전기자

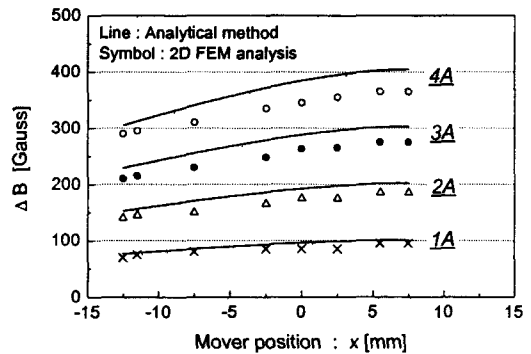


그림 8 공극자속밀도의 변화량  
Fig. 8 Deviation of airgap flux density

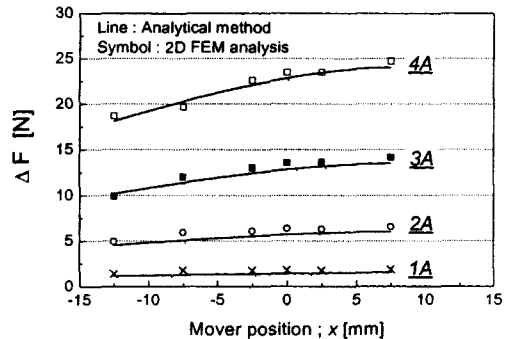


그림 9 추력의 변화량  
Fig. 9 Deviation of thrust

전류에 의한 push/pull 효과는 고려하지 않았다.

- ③ 본 LOA는 구조물 진동의 능동제어용 댐퍼로써 사용되므로 가동체 질량 23[kg]은 리니어 베어링에 의해 지지되어 왕복운동을 한다. 따라서 기동시 정지마찰력과 운동마찰력은 존재하지만 모델링에서는 이를 고려하지 않았다.
- ④ 가동자는 전기자 코일이 영구자석에 의한 자계속에서 왕복운동 하도록 스톱퍼로 제한을 두었다. 따라서 최대 이동 범위는 (-)12.5[mm]부터 (+)7.5[mm]까지이며 이를 출력 변위의 포화(Saturation)로 고려하였다.

그림 11과 그림 12는 5Hz와 20Hz 정현파 입력시 전류와 가동자 변위의 순시 파형이다. 실선과 점선은 각각 가동자 위치에 따라 일정한 인덕턴스값과 식 (11)의 가변 인덕턴스값을 가질 때의 시뮬레이션 결과이다. 그림 11(a)의 전류 파형의 경우 약간 차이가 발생하였지만, 그림 11(b)의 변위의 경우 최대값에서 10% 정도 차이가 발생하였다. 그림 13는 가동코일 인덕턴스의 순시 파형을 보여준다. 그림 11의 5Hz 입력시 가동자가  $x=0$  [mm]을 중심으로 왕복 운동을 할 경우 인덕턴스는 그림 13과 같이 25[mH] 이상 변화하였다.

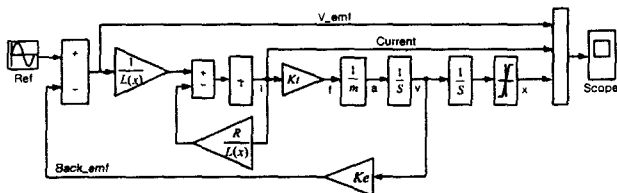


그림 10 인덕턴스 변화  $L(x)$ 를 고려한 시뮬레이션 블록도  
 Fig. 10 Simulation block diagram considering variable inductance  $L(x)$

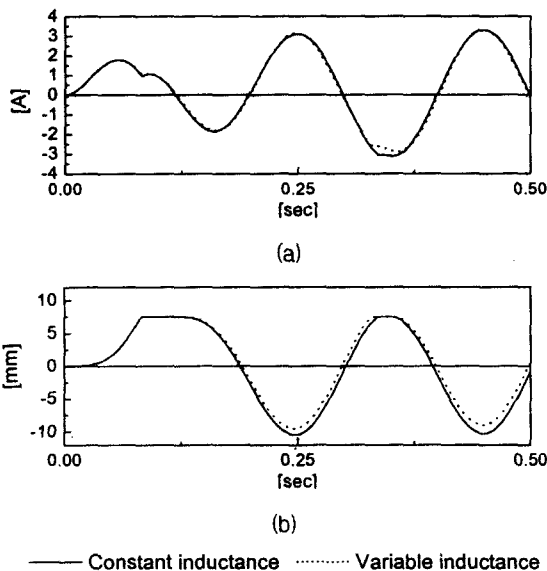


그림 11 동특성 비교(5Hz, 20V 입력시)  
 (a) 전류의 순시 파형; (b) 변위의 순시 파형  
 Fig. 11 Comparisons of dynamic characteristics  
 (a) Current waveform; (b) Displacement waveform

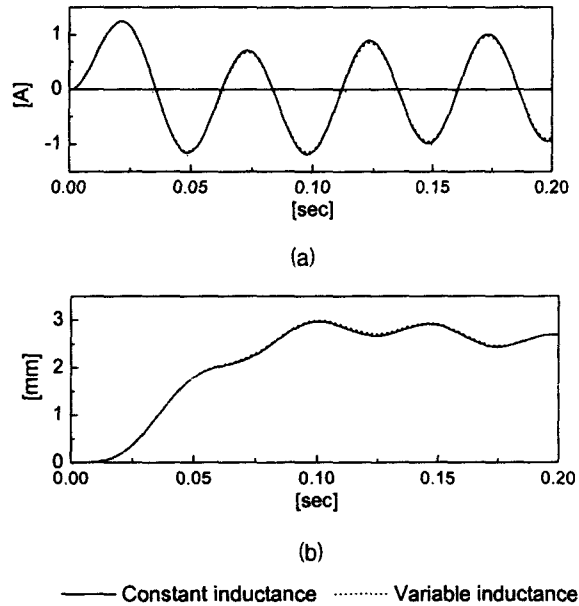


그림 12 동특성 비교(20Hz, 20V 입력시)  
 (a) 전류의 순시 파형; (b) 변위의 순시 파형  
 Fig. 12 Comparisons of dynamic characteristics  
 (a) Current waveform; (b) Displacement waveform

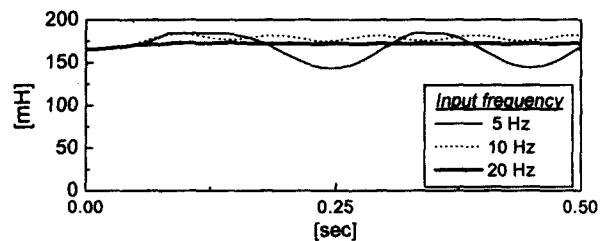


그림 13 인덕턴스 변화  
 Fig. 13 Deviation of inductance

따라서 진동 및 소음 제어 등과 같이 정밀한 위치 제어가 필요한 가동코일형 LOA의 응용에서는 인덕턴스 변화를 반드시 고려해야 하고, 더욱이 자기회로 설계시에는 이러한 변화를 가능한 작게 하는 방향으로 설계되어야 한다.

#### 4.2 Push/pull 효과를 고려한 동특성

가동코일 전류에 의한 push/pull 효과는 가동코일에 입력되는 전류 크기와 방향, 그리고 가동코일 위치에 따라 다르다. 본 절에서는 입력 전류 크기와 방향에 따른 push/pull 효과만을 고려하여 그림 14와 같은 블록도를 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 push/pull 효과는 MATLAB의 s-function을 이용하였고 다음과 같은 가정을 두었다.

- ① push/pull 효과를 고려한 유기전압 및 추력 상수  $[N/A$  or  $V \cdot s/m]$ 는 식 (12)와 같이 정해졌다[5,8]. 즉,

$$k_T = k_E = \begin{cases} 50 & \text{for push effects} \\ 70 & \text{for pull effects} \end{cases} \quad (12)$$

- ② 가동자 위치에 따른 인덕턴스 변화는 없다고 본다. 즉,  $x=0$  일 때에 실험과 3차원 유한요소해석에 의해 구

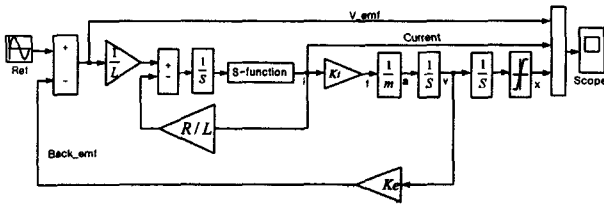


그림 14 push/pull 효과를 고려한 시뮬레이션 블록도  
Fig. 14 Simulation block diagram for push/pull effects

해진  $L=170\text{mH}$ 로 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

③과 ④는 4.1절의 가정과 동일하다.

그림 15와 그림 16은 push/pull 효과를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 시뮬레이션 결과이며, 이를 동특성 시험 결과와 비교하였다. 그림 15의 20Hz (+) 정현파 입력시 push/pull 효과를 고려하지 않은 경우에는 3[mm] 위치로 편위하여 왕복운동하였다. 그러나 고려한 경우에는 최대 변위까지 편위하였으며, 실험값과 비교적 잘 부합되는 경향을 보였다. 다만 마찰계수 등을 고려하지 않았기 때문에 편위하는 시간은 다르다.

그림 16은 10Hz (-) 정현파 입력시 동특성으로 가동코일 전류에 의한 push/pull 효과가 더욱 확실히 나타난다. 즉, push/pull 효과를 고려하지 않은 그림 16(a)의 경우에는 초기 입력 전류 방향에 의해 편위 방향이 결정되므로 변위는 -4[mm] 위치에서 왕복운동을 한다. 그러나 push/pull 효과를 고려한 결과에서는 그림 16(b)와 같이 초기에 (-) 측으로 편위한 후 다시 (+) 측으로 편위하여 왕복운동을 하였다. 이는 그림 16(c)의 동특성 실험과 동일한 결과를 가진다. 다만 마찰계수 등을 고려하지 않았기 때문에 편위 소요시간과 전류의 크기가 약간 다르게 나타남을 볼 수 있다.

4.3 가변 인덕턴스와 push/pull 효과를 동시에 고려한 동특성

4.1절의 그림 10와 4.2절의 그림 14의 시뮬레이션 블록도를 통합함으로써 가변 인덕턴스와 가동코일 전류에 의한 push/pull 효과를 동시에 고려한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 17은 시뮬레이션 결과인데, push/pull 효과만을 고려할 경우에 전류와 가동자 변위의 순시파형은 차이가 발생하였다. 그러나 가동자의 동적 특성에 큰 영향을 미치는 것은 push/pull 효과임을 알 수 있었다.

5. 결 론

개방형 자기회로를 갖는 가동코일형 LOA의 경우 불평형 자계 에너지 분포로 인하여 가동자 위치에 따라 인덕턴스는 큰 차이가 발생한다. 또한 push/pull 효과에 의한 왕복 불평형 추력은 발생한다. 따라서 코일의 인덕턴스와 push/pull 효과를 고려한 LOA의 특성을 해석하기 위해 가동자 위치에 따른 퍼미언스 모델을 유도하고 이를 통해 특성식을 도출하였다. 또한 이 결과를 FEM 해석을 비교하였으며 동특성 해석과 시험을 수행하여 그 특성을 얻을 수 있었다. 즉,

- (1) 가동코일 위치에 따른 퍼미언스 모델을 통해 인덕턴스 특성식을 유도하고 이를 해석하였다. 해석 결과는 2차원 유한요소해석 결과와 일치하였으며 가동자가 자기회로 안쪽에 위치할수록 선형적으로 증가하였다. 이러한 인덕턴스의 변화를 통해 가동코일형 LOA에서도 킬러턴스 추력이 존재함을 예상할 수 있다.
- (2) 공극자속밀도와 추력의 변화량에 대한 특성식을 얻음으로써 가동자 위치에 따른 push/pull 효과를 해석하였다. 공극자속밀도의 변화는 코일이 자기회로 안쪽에 위치할수록 약간 증가하는 경향을 가졌고 2차원 유한요소 해석 결과보다 비교적 큰 값을 가졌다. 또한 push/pull 효과에 의한 추력 변화량은 유한요소해석 결과와 비교적 일치하는 특성을 갖는다.
- (3) 가동자 위치에 따른 인덕턴스 변화를 고려하여 동특성 알고리즘을 구성하였고 이를 일정한 인덕턴스로 시뮬레

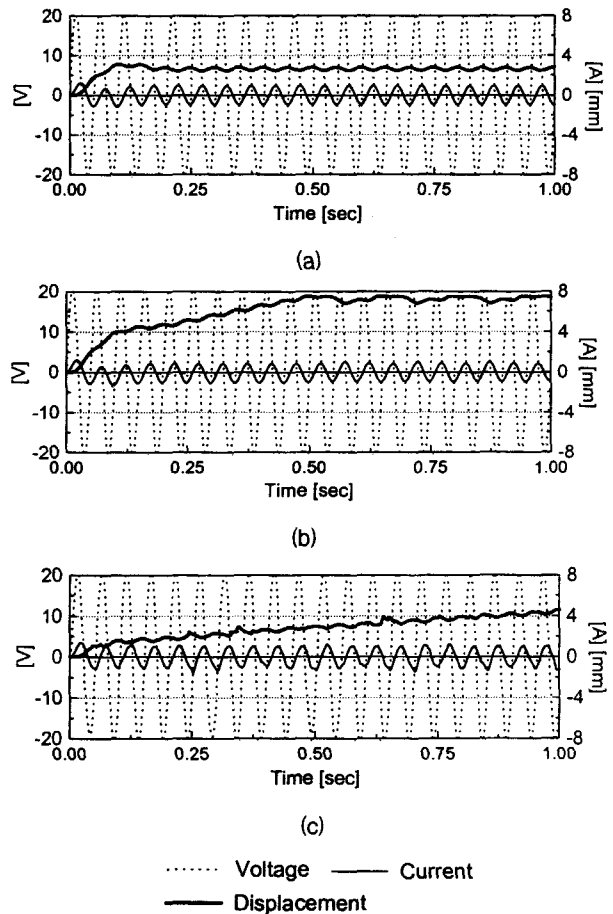


그림 15 (+) 정현파 입력시 동특성(20Hz)  
(a) Push/pull 효과를 고려하지 않은 시뮬레이션;  
(b) Push/pull 효과를 고려한 시뮬레이션;  
(c) 실험  
Fig. 15 Dynamic characteristics at (+) sine wave excitation(20Hz)  
(a) Simulation no considering push/pull effects  
(b) Simulation considering push/pull effects  
(c) Experiment

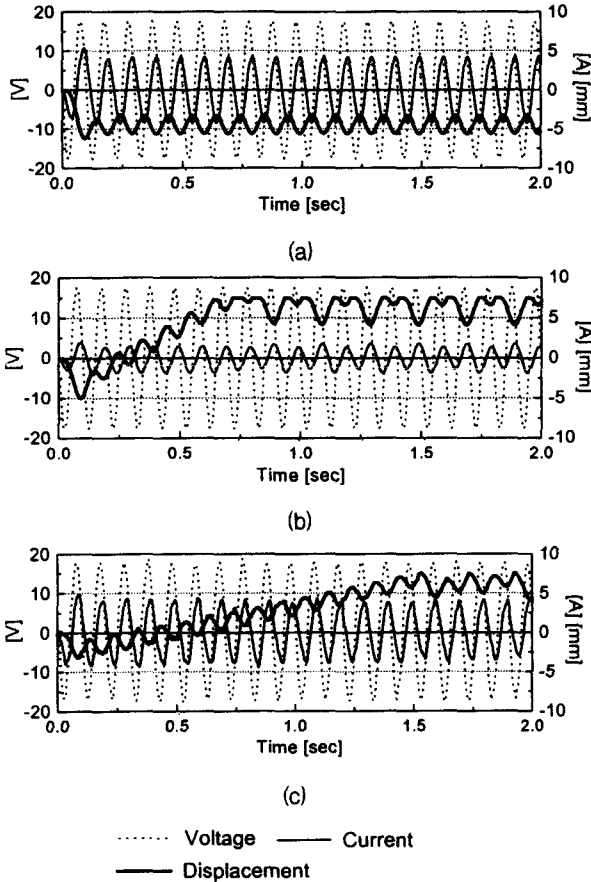


그림 16 (-) 정현파 입력시 동특성(10Hz)  
 (a) Push/pull 효과를 고려하지 않은 시뮬레이션  
 (b) Push/pull 효과를 고려한 시뮬레이션  
 (c) 실험  
 Fig. 16 Dynamic characteristics at (-) sine wave excitation (10Hz)  
 (a) Simulation no considering push/pull effects  
 (b) Simulation considering push/pull effects  
 (c) Experiment

이전을 수행한 결과와 약간의 차이가 발생하였다. 따라서 정밀한 위치 제어가 필요한 응용에서는 인덕턴스의 변화를 반드시 고려해야 하고, 설계시에는 이러한 변화를 가능한 작게 해야 한다.

(4) push/pull 효과를 고려한 동특성 알고리즘을 구성하였고 이를 시뮬레이션한 결과와 동특성 시험 결과는 비교적 같은 경향을 보였다. 다만 마찰계수 등을 고려하지 않았기 때문에 편위하는 시간은 길었다.

따라서 가동코일형 LOA의 가동자 위치에 따른 인덕턴스와 push/pull 효과의 특성식을 유도하고 그 특성 해석 결과를 통해 LOA의 정밀 설계와 구동 및 제어 시스템 구성에 중요한 자료를 확보할 수 있었다.

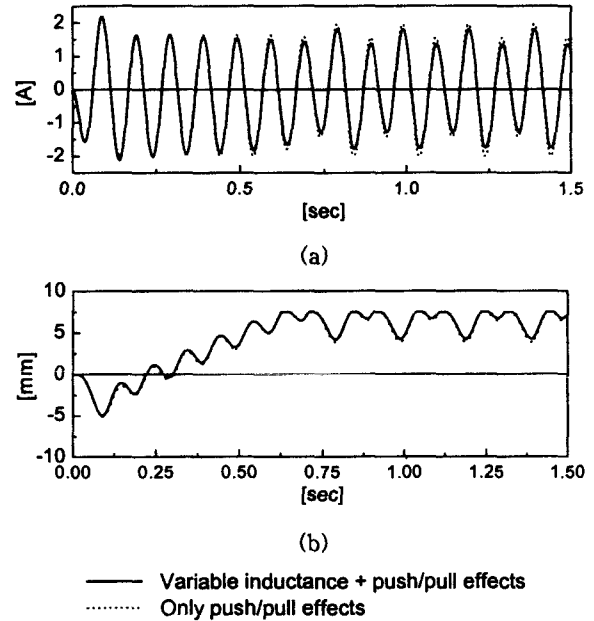


그림 17 (-) 정현파 입력시 동특성(10Hz)  
 (a) 전류의 순시 파형; (b) 변위의 순시 파형  
 Fig. 17 Dynamic characteristics at (-) sine wave excitation(10Hz)  
 (a) Current waveform; (b) Displacement waveform

참 고 문 헌

- [1] S.A. Nasar, Iboldea, "Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Application", Prentice-Hall, Inc., 1987
- [2] 山田 一, "리니어모터 응용핸드북", 일본공업조사회, 1985
- [3] J.Arthur Wagner, "The shorted turn in the linear actuator of a high performance disk drive," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-18, No. 6, November 1982
- [4] Hi-Dong Chai, "Present status of voice coil motor, various design techniques and key performance parameters", Intelligent Motion proceedings. pp.84-106, sept. 1991
- [5] 장석명, 정상섭, 박희창, 문석준, 박찬일, 정태영, "영구자석 계자와 전기자 자속의 상호작용효과를 고려한 가동코일형 리니어모터의 동특성", 전기학회 논문지 48B권 1호, pp19~26, 1999. 1
- [6] 장석명, 정상섭, 박희창, 문석준, 박찬일, 정태영, "능동 진동제어 시스템에의 보이스코일형 LOA 응용" 전기학회 논문지, 제 46권 제6호, pp. 862-868, 1997.6
- [7] 장석명, 정상섭, 박희창, 문석준, 박찬일, 정태영, "리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액츄에이터의 설계제작 및 제어정수 도출", 전기학회 논문지, 제 48B권 제 5호, pp241-248, 1999.
- [8] 장석명, 정상섭, 권철, 박희창, 문석준, 박찬일, 정태영, "가동코일형 리니어 왕복 액츄에이터의 동특성",

전기학회 논문지 49B권 3호, pp180~187, 2000. 3

- [9] Y.Hisashi, M.Norhisam, W.Hiroyuki, M.Keiichi, F.Nobuhiro, T.Kazuya, N.Masami, "Simplified expression for coil inductance of a linear DC motor," LDIA '98, Tokyo, Japan

- [10] Duane C. Hanselman, "Brushless permanent-magnet motor design," McGraw-Hill, 1994

---

## 저 자 소 개



### 정 상 섭 (鄭 相 燮)

1971년 1월 29일 생. 1996년 충남대 전기 공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사 졸업. 1998년~현재 충남대 대학원 박사과정 수료

Tel : 042-821-7608

E-mail : sangsub@ee.chungnam.ac.kr



### 장 석 명 (張 錫 明)

1949년 7월 3일 생. 1986년 한양대 대학원 박사과정 졸업(공박). 1989년 미국 Univ. of Kentucky(Post-doc). 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수. 현재 당학회 평의원, 편집이사

Tel : 042-821-5658

E-mail : smjang@ee.chungnam.ac.kr