

가동자 위치에 따른 가동코일형 LOA의 인덕턴스 변화와 Push/pull 효과

장석명*, 정상섭*, 권철*, 문석준**, 정태영**
 *충남대 전기공학과 **한국기계연구원

Inductance and Push/pull Effects of Moving Coil Type LOA with Consideration of a Mover Positions

S.M. Jang*, S.S. Jeong*, C. Kweon*, S.J. Moon**, T.Y. Jung**
 *Chung-Nam National Univ. **KIMM

Abstract - A moving-coil-type 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 inductance of moving coil and the push/pull effect is obtained from the permeance model of LOA with the open magnetic circuit. The analytical method are verified using the 2D finite element method.

1. 서 론

일반적으로 전기기기에서 권선 인덕턴스는 제어시스템 설계에 있어서 중요한 파라미터가 된다. 특히 서보 액츄에이터로써 구동을 하기 위한 가동코일형 LOA는 가/감속 및 정지동작을 빈번하게 반복하므로, 발생 추력은 물론 과도상태에서의 제어정수가 매우 중요한 의미를 갖는다. 따라서 가동코일형 LOA의 경우 속응성이 양호하도록 시정수를 작게 하기 위하여 쇼트링 등을 이용하여 인덕턴스를 적게 하기도 한다[2].

한편, 가동코일형 LOA의 발생력은 로렌즈 법칙에 따라 영구자석에 의한 공극자속밀도와 가동코일인 전기자전류의 곱으로 표현된다. 그러나 코일전류에 의한 자계가 공극자속밀도의 **減磁/增磁** 현상을 발생시켜 왕복 추력의 불균형을 가져온다. 이를 'push/Pull 효과'라 부르는데, 전기가 전류의 방향과 크기 및 가동코일 위치에 따라 다르며, 영구자석보다 가동코일의 길이가 긴 **長 코일형**의 경우에 이러한 효과는 크다[3]. 또한 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[4].

그런데 가동자 위치에 따른 인덕턴스 변화에 대한 연구는 물론 push/pull 효과에 의한 불평형 추력을 고려한 LOA의 동특성에 대한 연구도 수행된 바가 없다. 따라서 본 논문에서는 실제 제작된 가동코일형 LOA의 가동자 위치에 따른 퍼미언스 모델을 통해 가동코일의 인덕턴스 변화와 push/pull 효과를 고려한 특성식을 도출하였다. 그리고 이 결과를 FEM 해석 결과와 실험결과와 비교 검토함으로써 해석적 방법의 타당성을 입증하였다.

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 가동

자에 작용하는 추력은 식(1)과 같다.

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

여기서 I, 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 같다.

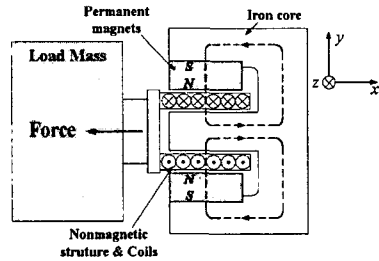


그림 1 가동코일형 LOA

그러나 실제 전기가 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 지나는 자속 ϕ_g 과 개방된 영역을 따라 외부로 흐르는 자속 ϕ_m 로 분리된다. 코일길이 l_c 가 영구자석 길이 l_m 보다 짧은 **短코일형**의 경우에는 영구자석 길이내

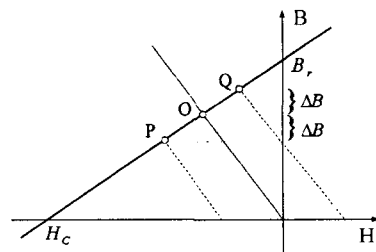


그림 2 감자곡선과 운전점 자속밀도

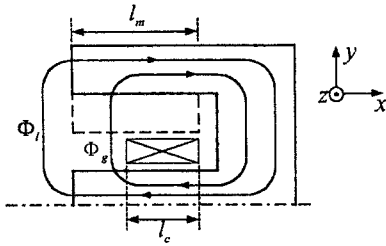


그림 3 코일 전류에 의한 자속 경로

에서 왕복운동을 하기 때문에 추력을 발생시키는 자속은 Φ_g 만을 고려하면 된다. 그러나 본 연구모델과 같이 코일길이가 영구자석보다 긴 장코일형인 경우에는 Φ_i 도 추력에 영향을 주기 때문에 이를 고려해야 한다.

코일 전류에 의한 발생자속 Φ_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 페리먼스, P_l : 프린징에 의한 페리먼스다. 만약, 철심의 자기저항을 무시한다면 가동코일의 공극 페리먼스는 그림 4(a)의 모델을 통해 식 (3)과 같다.

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

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

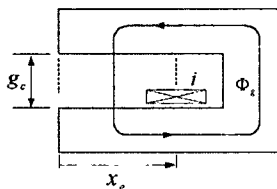
$$x_c = \frac{l_m}{2} + x \quad (4)$$

여기서 l_m : 영구자석의 길이, x : 가동 코일의 위치로 가동코일의 중심이 영구자석의 중심에 있을 때를 $x = 0$ 으로 정의한다.

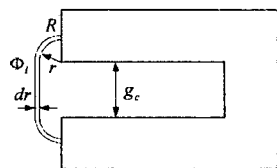
한편, 프린징에 의한 페리먼스는 그림 4(b)를 통해 모델링하면 식 (5)와 같다.

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

여기서 $dA = Ldr$, $l = g_c + \pi r$ 이며, R : 프린징 자속을 고려한 길이로 공극의 수배로 한다[5].



(a) 공극 페리먼스



(b) 누설 페리먼스

그림 4 페리먼스 계산을 위한 모델

2.3 가동자 위치에 따른 인덕턴스와 Push/pull 효과의 특성

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.

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

여기서 N 는 코일 턴수이다.

또한, 코일 자체에 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 ΔB 는 식 (3)과 식 (5)를 통해 식 (8)과 같다.

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

그리고 공극자속밀도의 변화에 따른 추력의 변화량 ΔF 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 LOA는 구조물 진동의 능동 제어시스템에 응용한 것으로 주요 사양은 표 1과 같다[5]. 또한 유한요소해석 및 실험의 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.

표 1 LOA 모델의 사양

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

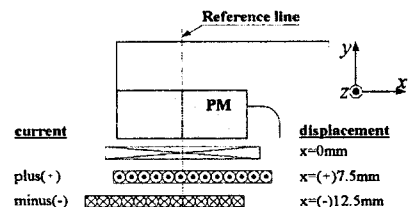
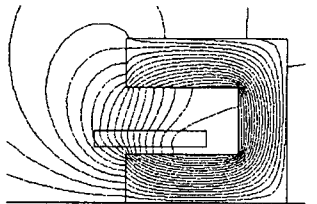


그림 5 가동자의 위치와 전류방향 정의

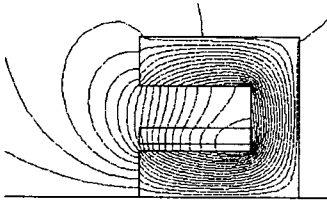
3.2 가동자 위치에 따른 인덕턴스 특성

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

그림 7은 가동자 위치에 따른 가동코일의 인덕턴스로 실험 및 유한요소 해석 결과와 식 (6)에 의한 해석결과를 비교한 것이다. 가동자 위치에 따른 인덕턴스는 모두 동일한 경향, 즉 가동자의 위치가 (+)의 위치에 있을수록 인덕턴스가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 식 (6)에 의한 해석결과는 프린징 부분의 적분길이 R 를 공극길이의 2배 정도로 하는 경우에 2차원 유한요소해석 결과와 일치하였다. 또한 가동자 위치에 따른 인덕턴스의 변화를 통해 가동코일형 LOA에서 톨릭턴스 추력이 존재함을 예상할 수 있다.



(a) $x = -10\text{mm}$



(b) $x = 10\text{mm}$

그림 6 가동코일 전류에 의한 자속 분포

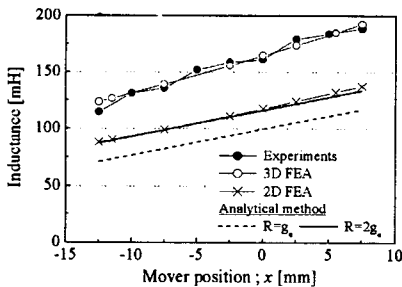


그림 7 가동자 위치에 따른 코일의 인덕턴스

3.3 가동자 위치에 따른 push/pull 효과

그림 8과 그림 9는 가동자 위치에 따른 push/pull 효과에 의한 공극자속밀도와 추력의 변화량을 보여주는 데, 각각 식 (8)과 식 (9)에 의해 계산된 값과 2차원 유한요소 해석값을 비교하였다. 그림 8에서 가동코일 영역내의 평균 공극자속밀도의 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.

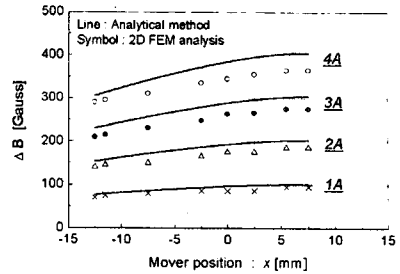


그림 8 Push/pull 효과에 의한 공극자속밀도의 변화량

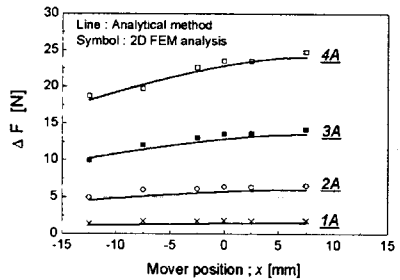


그림 9 Push/pull 효과에 의한 추력의 변화량

4. 결론

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 2차원 FEM 해석 결과와 비교하였다.

(1) 가동코일 위치에 따른 퍼미언스 모델을 통해 인덕턴스 특성식을 유도하고 이를 해석하였다. 해석 결과는 2차원 유한요소해석 결과와 일치하였으며 가동자 자기회로 안쪽에 위치할수록 선형적으로 증가하였다. 이러한 인덕턴스의 변화를 통해 가동코일형 LOA에서도 톨릭턴스 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 해석결과보다 비교적 큰 값을 가졌다. 또한 push/pull 효과에 의한 추력 변화량은 유한요소해석 결과와 비교적 일치하는 특성을 갖는다.

(참고 문헌)

- [1] S.A. Nasar, I. boldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Application", Prentice-Hall, Inc., 1987
- [2] 山田 --, "리니어모터 응용핸드북", 일본공업조사회, 1985
- [3] 장석명, 정상섭, 박희창, 문석준, 박찬일, 정태영, "영구자석 계자와 전기자 자속의 상호작용효과를 고려한 가동코일형 리니어모터의 정특성", 전기학회 논문지 48B권 1호, pp19~26, 1999, 1
- [4] 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.
- [5] Duane C. Hanselman, "Brushless permanent magnet motor design," McGraw-Hill, 1994