

가동코일형 LOA에서의 전기자 반작용 저감법

장석명, 정상섭, 이성호, 윤인기
충남대 전기공학과

Reduction of Armature Reaction for Moving Coil Linear Oscillatory Actuator

S.M. Jang, S.S. Jeong, S.H. Lee, I.K. Yun
Chung-Nam National Univ.

Abstract - In moving coil LOA, the variation of mover position and the consequent changes of coil flux path affect the coil inductance because of unbalanced magnetic circuit. Furthermore, the armature field shifts and distorts the airgap flux density distribution due to the magnet alone by a certain amount, which cause the unbalanced reciprocating force. In this paper, we propose the reduction method of armature reaction and coil inductance. The proposed LOA has the shorted ring, the saturated core, the double coil, and Halbach array.

1. 서 론

서보 액츄에이터로서 구동을 하기 위한 가동코일형 LOA는 가/감속 및 정지동작을 빈번하게 반복하므로, 과도상태에서의 시정수는 매우 중요한 의미를 갖는다. 또한, 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. 따라서 정밀한 제어 특성이 요구되는 구동력 발생 장치에 응용하는 경우, 설계 단계에서는 전기자 전류 자계에 의한 영구자석의 퍼미언스 계수 저하로 발생하는 잔류자속밀도 감소, 모터의 해석과 운전 제어에서는 push/pull 효과로 인한 추력 변화 등을 고려해야만 한다.

본 논문에서는 전기자 반작용 및 인덕턴스를 최소화 하기 위한 3가지 방법을 제시하고 그 특성을 해석한다. 그 방법으로는 ① 쇼트링 설치, ② 차동 권선법, ③ Coreless 자석배열법, ④ 자기회로 포화법을 제시한다. 그리고 인덕턴스 및 추력 불균형 특성을 FEM을 통해 해석 비교할 것이다.

2. 전기자 반작용과 저감법

2.1 가동코일형 리니어 모터의 전기자 반작용

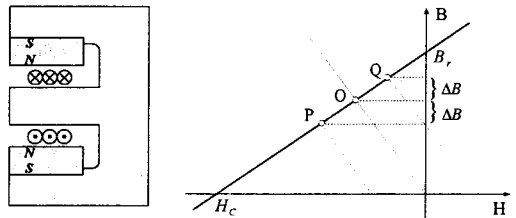
가동코일형 리니어 모터는 그림 1(a)와 같이 영구자석에 의한 계자와 보빈에 코일을 감은 전기자로 구성된다. 일반적으로 그림 1(a)의 리니어 모터 구조를 가동코일형 LOA라 부르는데, 코일에 정전파 또는 구형파의 교번전류를 인가하면 가동자는 일정 스트로크로 왕복운동을 하게된다. 만일 가동자가 x 방향으로만 운동한다면 가동자에 작용하는 추력은 식(1)과 같다.

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

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 같다.

그러나 실제 전기자 전류에 의한 자속의 영향은 추력 및 유기전압 상수에 영향을 준다. 즉, 코일 전류가 입력되지 않을 때 운전점 자속밀도는 그림 1(b)의 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.



(a) 기본모델 (b) 전기자 반작용
그림 1 가동코일형 LOA와 전기자 반작용

2.2 쇼트링

가동코일형 리니어모터에서 가동코일의 가속력은 코일의 전류에 직접적으로 비례한다. 그러므로 전류의 빠른 상승은 가속시간을 짧게 한다. 이러한 조건을 만족시키는 방법 중에 하나는 그림 2(a)에서 보여지듯이 copper sleeve(shorted turn 이하 쇼트링)를 가동코일과 같은 축, 즉, 센터 요크에 놓는 것이다. 쇼트링이 띠 단전성이 양호한 동파이프를 센터 요크 바깥 둘레에 씌운 것이며 센터 요크에 발생하는 맴돌이 전류를 확산시킨다. 결과적으로 코일 관점에서 유효 인덕턴스는 상당히 감소한다. 따라서 전류의 상승은 빨라지므로 기동시 좀 더 큰 가속력을 갖는다. 만약 쇼트링의 저항이 영(zero)라면 가동코일은 순수한 저항만 있는 회로처럼 작동할 것이다. 결과적으로 전류와 인가되는 전압이 동상이 된다. 그러나 설치에 의해 자기회로의 공극 거리가 증대하기 때문에 공극자속밀도가 저하된다. 따라서 쇼트링의 두께를 얼마로 할 것인가에 대하여는 모터의 제성능을 고려하여 결정해야 한다.

2.3 철심포화법

보자력이 큰 영구자석을 갖는 자기회로의 경우, 높은 잔류 자속밀도뿐만 아니라 가동코일 전류에 의해 발생하는 자계에 대하여 안정도를 갖는다. 더욱이 가동코일의 인덕턴스의 증가를 저감시키기 위하여 그림 2(a)에서처럼 자기적으로 포화된 철심을 사용하기도 한다.

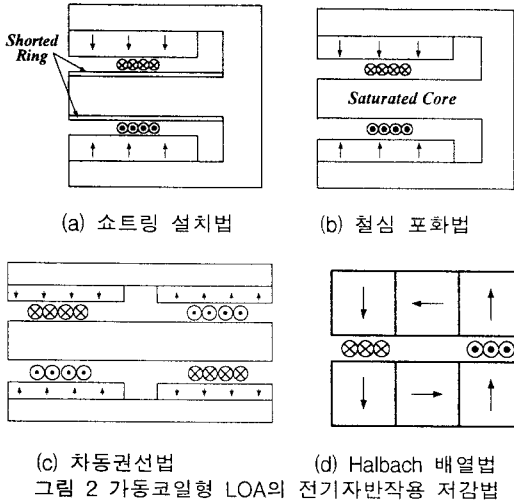
2.4 차동 권선법

그림 2(a)(b)에서의 측면 요크를 없애고 바깥쪽 요크

에 서로 다른 자극으로 영구자석을 사용한다. 그리고 그 아래에 서로 반대방향으로 감고 직렬연결할 경우 두 코일 자계는 반대방향이 되어 인덕턴스가 최소화시킬 수 있다. 또한 양쪽 코일에서의 자계특성이 대칭이므로 불평형 추력도 상쇄되어 안정된 왕복운동을 갖는다. 다만 모터의 길이가 최소한 2배이상 커지는 단점이 있을 것으로 사료된다.

2.5 Halbach 배열법(Coreless)

영구자석 계자 시스템을 철심없이 영구자석만으로 사용된다면 공심형 코일과 같으므로 인덕턴스를 작게 할 수 있다. 그러나 영구자석만으로 조립하기가 매우 어려운 단점이 있다.



3. 설계 결과 및 특성 비교

3.1 설계 조건

표 1은 그림 1의 기본 모델과 그림 2의 차동권선법을 갖는 두 모델에 적용될 설계 조건 및 사양이다. 자기회로 형상은 직육면체 구조를 갖는 모델로 설계한다. 또한 요구되는 주파수-스트로크 특성은 그림 3과 같다. 이때 필요한 최대치 추력은 대략 35N이다. 한편, 영구자석은 NdFeB로 $25 \times 25 \times 10$ (mm)를 사용하였으며, 가동코일은 단코일형으로 선정하였다. 그리고 전류밀도와 점적율은 각각 4A/mm^2 , 0.6이며, 철심의 포화자속밀도는 1.7T로 정하였다.

표 1 설계 조건 및 사양

항 목	사 양	
자기회로 형상	직사각형	
정격 전압	24 V	
정격 운전 주파수	15 [Hz]	
정격 운전 스트로크	± 2 [mm]	
최대 운전 스트로크	± 6 [mm]	
정격 부하 질량	2 [kg]	
코일	형상	단코일형
	전류밀도(rms)	4 [A/mm ²]
	점적율	0.6
영구 자석	계 열	NdFeB
	잔류자속밀도	1.1 [T]

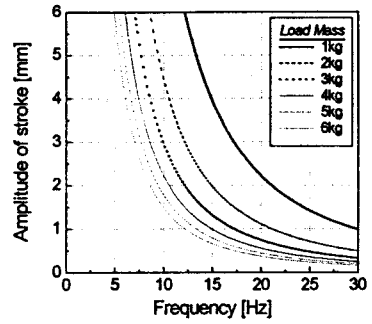


그림 3 주파수 vs. 스트로크 특성

3.2 설계 결과

표 2는 설계 결과로 일반(기본) 모델의 경우 철심을 포화시키지 않았으므로 고정자는 좀 더 무거웠으며 폭은 큰 반면 모터의 길이는 짧아졌다. 반면 차동권선법을 갖는 모터(이하 Double coil Motor)는 철심을 2.0T 정도에서 포화시켰으므로 고정자는 가볍고 길이가 긴 모터형상을 갖는다. 더욱이 코일의 인덕턴스를 비교해 보면 Double coil형이 7배 이상 작았다. 이는 전기적 시정수를 줄임으로써 응답성을 현저히 향상시킬 수 있다.

표 2 설계 결과 및 제어정수

항 목	일반모델	Double Coil + 포화코어
턴수	1159	1454
공극자속밀도	0.52	0.45
고정자 길이	107 mm	120 mm (140 mm)
고정자 질량	2.7	1.5 kg(1.8 kg)
코일 저항	36 Ω	20 Ω
코일 인덕턴스	318 mH	43 mH
추력상수	55~63	≈35
효율	30 %	37 %

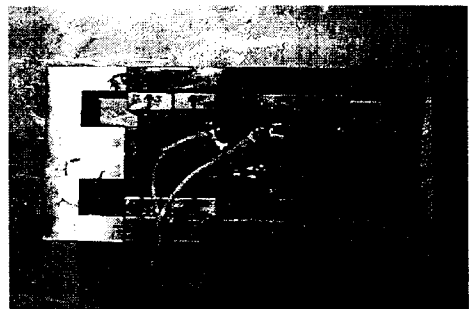
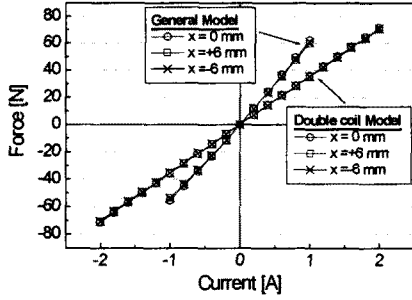


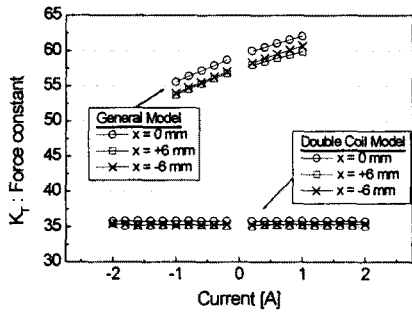
그림 4 차동권선을 갖는 LOA(Double coil type)

3.3 추력 특성

그림 5는 두 모델의 전류에 따른 추력 특성을 보인 것이다. 그림 5(a)의 추력특성을 비교해 볼 때, 기본 모델의 경우 전류에 따른 추력의 표준편차는 약 1.3이며 코일 위치에 따라라도 발생추력이 비교적 큰 차이가 났다. 즉, 동일 전류를 인가 하더라도 자석 중심($x=0\text{mm}$)에서 가장 큰 추력이 발생하였다. 반면, Double coil형은 추력 표준편차는 약 0.1이며 코일 위치에 따라 추력차이가 크지 않았다.



(a) 전류에 따른 추력 특성



(b) 전류에 따른 추력상수

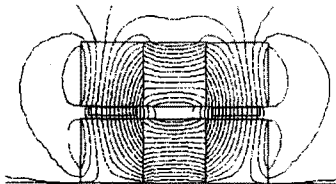
그림 5 가동위치를 고려한 전류에 따른 추력 특성

이러한 특성은 그림 5(b)의 추력상수를 통해서도 알 수 있다. Double coil형의 경우 전류당 추력은 작지만 코일 전류에 따라 매우 일정한 추력 상수를 갖는다. 반면 기본 모델은 전기자 전류에 의한 증자 및 감자 작용에 의해 코일 위치와 인가 전류에 따라 추력 상수의 차이가 컸다. 이로써 제안된 Double coil형 모델의 경우 전기자 반작용을 최소화시킬 수 있었으며 좌우 대칭 추력이 발생함으로써 제어 및 왕복운동 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

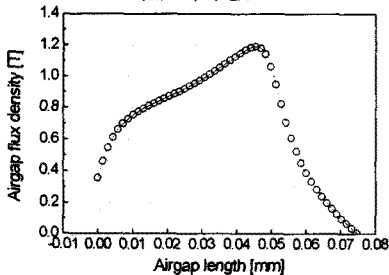
4. Halbach LOA의 특성 해석

4.1 자계 특성

영구자석만으로 구성된 Halbach LOA는 그림 6과 같은 자계 특성을 갖는다. 원형 Halbach에 비해 누설 자속이 크지만 강한 공극자계를 얻을 수 있다. 그러나 균일한 공극자속밀도 분포를 얻을 수 없었다.



(a) 자속분포



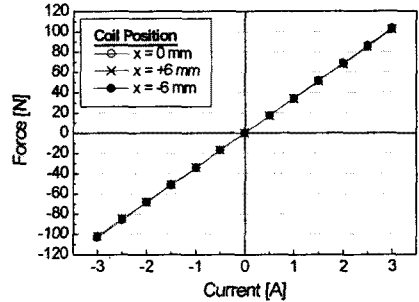
(b) 공극자속밀도 분포

그림 6 Halbach LOA의 자계 특성

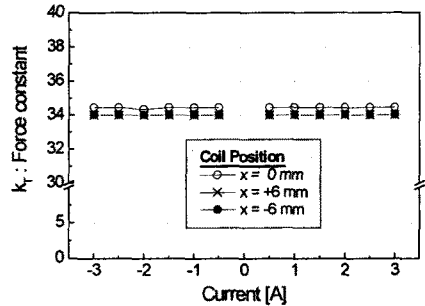
4.2 인덕턴스 및 추력 특성

Halbach LOA는 영구자석만으로 구성될 뿐만 아니라 권선도 차동으로 감기므로 인덕턴스는 최소화할 수 있다. 가동코일 인덕턴스는 FEM 해석 결과 11mH로 다른 모델에 비해 매우 작았다. 따라서 고속 응답에 매우 유리할 것으로 사료된다.

한편, 전류에 따른 추력 특성은 그림 7에서 보이는데, 표준편차가 약 0.05 정도로 매우 선형적인 특성을 가졌다. 또한 그림 6(b)와 같이 공극자속밀도 분포가 불균일함에도 불구하고 좌우 대칭구조이므로 코일 위치에 따라 거의 같은 추력을 발생시켰다.



(a) 전류에 따른 추력 특성



(b) 전류에 따른 추력상수

그림 7 Halbach LOA 추력 특성

5. 결론

코일 자계가 공극자속밀도의 減磁/增磁 현상을 발생시켜 왕복 추력의 불균형을 가져온다. 따라서 정밀한 제어 특성과 고속 응답성이 요구되는 구동력 발생 장치에서는 전기자 반작용 및 인덕턴스를 최소로 하여야 한다. 본 논문에서 일반 모델과 요크를 포함시킨 차동 권선법, 그리고 Halbach 배열과 차동권선법을 이용 Coreless LOA를 동일 조건에서 설계하였다. 그리고 인덕턴스와 추력 특성을 비교하였다. 그 결과 추력의 선형성과 전기자 반작용면에서 있어서는 Halbach LOA가 가장 우수하였으며 차동권선법을 갖는 LOA도 매우 우수하였다. 그러나 제작상의 문제를 고려해 본다면 차동권선법을 갖는 LOA가 좀 더 실용적일 것으로 사료된다.

(참고 문헌)

- (1) 山田 一, "리니어모터 응용핸드북", 일본공업조사회, 1985
- (2) 장석명, 정상섭, 박희창, 문석준, 박찬일, 정태영, "영구자석 계자와 전기자 자속의 상호작용효과를 고려한 가동코일형 리니어모터의 정특성", 전기학회 논문지 48B권 1호, pp19