

밸브구동용 보이스 코일 선형 포스모터 설계와 해석 연구

A Study on the Design and Analysis of a Voice Coil Linear Force Motor for Hydraulic Valve

박창순¹ · 허준영^{2*}

C. S. Park and J. Y. Huh

Received: 14 may. 2012, Revised: 29 Sep. 2012, Accepted: 12 Oct. 2012

Key Words : Linear Force Motor(선형 포스 모터), Linear Actuator(선형 액추에이터), Moving Coil Motor(무빙 코일 모터), Voice Coil Force Motor(보이스 코일 포스 모터)

Abstract: The voice coil linear force motor is a kind of a direct drive motion device that uses a permanent magnetic field and coil winding to produce force. In order to design a voice coil linear force motor, an exact calculations of the required force, the flux density in air gap and the flux pathway are needed. A conventional method can be used usually to calculate the flux density in air gap, but with this method it is needed to find a magnetic circuit revision constant. In this paper a voice coil linear force motor is designed by conventional design method and analyzed by 3D simulation program "Flux". For the prototype linear force motor, the results of the calculated by conventional design method and the analyzed by 3D simulation program are compared with the test result. Finally it is showed that the magnetic circuit revision constant which is found by comparing of the analyzed and the measured data can be used for the design of the voice coil type linear force motor to minimize the trial and error.

기호 설명

A_c : coil cross-section area, mm²

A_g : air gap cross-section area, mm²

A_M : permanent magnet cross-section area, mm²

B_g : air gap magnetic flux density, T

B_r : remain magnetic flux density, T

k : magnetic circuit revision constant

F_s : average thrusting force, N

F_{max} : maximum thrusting Force, N

F_{min} : minimum thrusting Force, N

K_F : thrust constant

K_E : counter electromotive force constant

N : Number of Turns

V_{in} : input voltage, V

δ : air gap length, mm

d_{bo} : coil bobbin external diameter, mm

d_{mi} : magnet internal diameter, mm

d_{mo} : magnet external diameter, mm

d_{po} : plunger external diameter, mm

d_{yi} : yoke internal diameter, mm

d_{yo} : yoke external diameter, mm

h_b : coil bobbin height, mm

d_b : coil bobbin diameter, mm

h_y : yoke height, mm

l_b : coil bobbin length, mm

h_m : magnet internal height, mm

d_c : coil diameter, mm

μ_M : permanent magnet permeability

* Corresponding author: huh@kut.ac.kr

1 School of Electrical, Electronics & Communication Engineering, Korea University of Technology and Education

2 School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education, 1600 Byeongchun, Cheonan, Korea

Copyright © 2012, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

유공압 밸브를 구동하는 목적으로 사용되고 있는 모터는 빠른 응답성과 높은 주파수, 밸브구동을 위한 충분한 힘을 갖고 있어야 한다. 보이스 코일 선형 포스모터는 영구자석 계자를 갖는 자기회로와 보빈 및 가동코일로 이루어지며, 짧은 스트로크로 구동되는 선형 왕복운동을 위한 추력 발생장치이다. 추력의 크기와 방향은 코일에 흐르는 전류의 크기와 방향으로 제어되고 있으며 코일은 공극에 위치하고 철심이 없는 공극권선을 사용하고 있다. 따라서 전기적 시정수가 작고 자력을 이용하는 다른 선형 포스 모터의 플런저보다 관성이 작기 때문에 응답성이 빠르고 높은 주파수 특성을 갖고 있다^{1)~3)}.

밸브 구동용 액추에이터는 입력으로서 주어진 전기신호를 코일에서 1차적으로 전자기적 에너지로 변환한 다음, 최종적으로 플런저와 고정자가 형성하는 공극을 통하여 밸브의 유로를 개폐할 수 있는 기계적 운동에너지를 출력하는 에너지 변환장치이다²⁾.

액추에이터의 설계를 위한 핵심기술에는 자속밀도 해석기술과 자성재료 해석 및 결정기술, 권선수 계산 기술 등이 있으며 설계오차를 줄이기 위하여 다음과 같은 순서로 설계를 진행하고 있다³⁾.

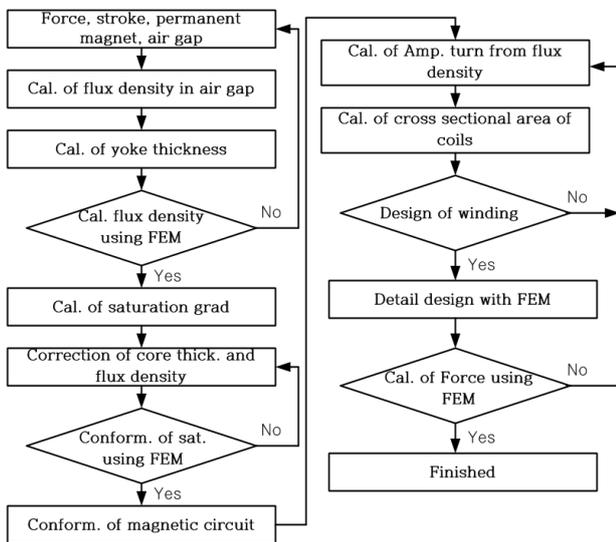


Fig. 1 Design sequence of a voice coil linear force motor.

보이스 코일 선형 포스모터 구동방식은 형상이 복잡하고 영구자석의 자속과 코일에 흐르는 전류에 의하여 추력이 발생하므로 정확한 공극 자속밀도의 계

산이 필요하다^{4)~6)}.

본 연구에서는 공극의 자속밀도를 계산하는데 필요한 자기회로 보정상수 k 를 구하여 이 값으로 향후 보이스 코일 포스모터를 설계하는데 시행착오를 줄일 수 있도록 하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 밸브 구동용 보이스 코일 선형 포스모터를 설계하는데 필요한 추력계산과 권선설계, 각 자로의 크기를 결정하는 식을 제시하고 계산값과 FEM프로그램을 이용한 해석값, 실험값을 비교 분석한다.

2. 밸브 구동용 보이스 코일 선형 포스 모터의 구조

보이스 코일 선형 포스모터는 전자장 형성을 위한 코일과 자력선의 통로인 요크(Yoke), 영구자석, 실질적인 스트로크를 형성하여 기계적 운동을 발생하는 아마추어(Armature), 아마추어를 복원시키는 스프링(Centering Spring) 등으로 구성된다. Fig. 2는 보이스 코일 선형 포스모터의 일반적인 구조를 나타낸다.

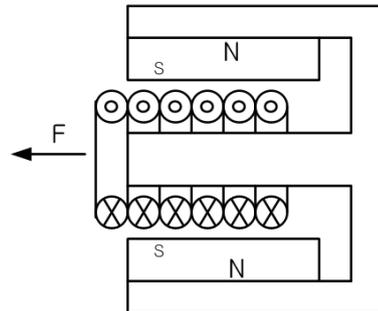


Fig. 2 Structure of a voice coil linear force motor

3. 보이스 코일 선형 포스모터의 구동원리

보이스 코일 선형 포스모터는 Fig. 2와 같이 영구자석에 의한 고정자와 플라스틱 보빈에 코일을 감은 아마추어로 구성되는데 코일에 정현파 또는 구형파의 교번전류를 인가하면 아마추어는 일정 스트로크로 왕복운동을 하게 된다. 만일 아마추어가 x 방향으로만 운동한다면 코일에 작용하는 추력은 (1)과 같다^{1)~2)}.

$$F = B_g l I N \tag{1}$$

여기서 l 과 N 은 각각 공극자계 속에 있는 코일의 길이와 유효 권선수를 나타낸다. 또한 B_g 는 영구자

석에 의한 공극자속밀도, I 는 아마추어 코일에 흐르는 전류이다. 추력상수 $K_F = B_g l N$ 을 도입하면 식(1)은 $K_F = F/I$ 로 된다.

4. 보이스 코일 선형 포스 모터 설계

4.1 필요추력 산출

필요한 최대추력(F_{max})은 부하(F_L)와 마찰력(F_F)을 이겨야 하고 가동 질량을 원하는 가속도로 동작시킬 수 있어야 한다. 따라서 최대추력은 식(2)와 같다.

$$F_{max} = F_L + F_F + F_m \quad (2)$$

여기서 F_m 은 가동부분의 질량으로 스프링질량과 코일질량의 합(m)과 가속도(α)의 곱으로 식(3)과 같다.

$$F_m = m \alpha \quad (3)$$

평균추력(F_s)은 연속 추력의 평균값을 말하며 식(4)로 계산할 수 있다³⁾.

$$F_s = \sqrt{\frac{F_{max}^2 t_1 + (F_L + F_F)^2 t_2 + (F_m - F_L - F_F)^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} \quad (4)$$

여기서 t_1 은 가속시간, t_2 는 운전시간, t_3 는 감속시간, t_4 는 정지시간을 나타낸다. 일반적으로 보이스 코일 포스모터의 스트로크는 수 마이크로미터에서부터 0.1 미터까지 사용되며 스트로크가 증가하면 코일의 중량과 크기가 증가한다. 그리고 영구자석의 길이도 증가하고 따라서 요크의 길이도 증가한다.

4.2 등가회로

Fig. 3와 같이 선형 포스모터의 양단에 전압 V 를 가하면 전류 I 가 흐른다. 전류는 저항 R 인 코일을 통하여 흐르고 동시에 역기전력 E 를 발생하며 역기전력은 코일의 이동속도에 비례한다. 역기전력의 방향은 단자전압의 반대이다.

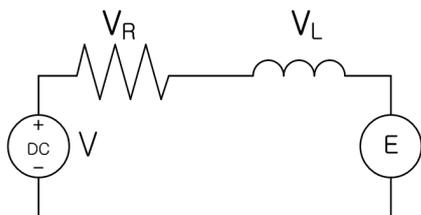


Fig. 3 Equivalent circuit of a voice coil linear force motor

최대전류는 Fig. 3에서 키르히호프 전압방정식을 이용하여 식(6)에 의하여 구한다.

$$V = V_R + V_L + E \quad (5)$$

$$I_{max} = \frac{F_{max}}{K_F} \quad (6)$$

최대온도로 상승한 코일의 저항 변화는 식(7)을 이용하여 구한다. 저항에서 최대 전압강하는 식(8)과 같다.

$$R_H = R_c [1 + 0.00393(T_{max} - 25)] \quad (7)$$

$$V_{max} = F_{max} \frac{R_H}{K_F} \quad (8)$$

K_E 를 역기전력 상수라 하면 최대 역기전력(E)는 식(9)와 같다. 최대속도는 식(10)을 이용하여 구한다. 여기서 D 는 전체 스트로크이다. 식(10)으로부터 최대 속도를 높이기 위해서 역기전력 E 를 크게 하여야 하며 E 를 크게 하기 위해서는 단자전압 V 를 증가시키거나 전압강하 V_R, V_L 를 작게 하여야 함을 알 수 있다. 한편 코일 인덕턴스에 의한 전압강하는 식(11)로 나타낼 수 있다. 따라서 최대 전압강하는 식(12)로 유도된다.

$$E = v_{max} K_E = v_{max} (1.356 K_F) \quad (9)$$

$$v_{max} = \frac{E}{K_E} = \frac{D}{t_1} \quad (10)$$

$$V_L = L \left(\frac{di}{dt} \right) \quad (11)$$

$$V_{max} = F_{max} \frac{R_H}{K_F} + L \frac{di}{dt} + 1.356 \cdot K_F \cdot v_{max} \quad (12)$$

Table 1 Desired specification

Rated Voltage	DC 24 [V]
Max. Stroke	±0.75 [mm]
Rated Current	3.0 [A]
Thrusting Force	60.0 [N]
Step response	30ms

요구되는 사양을 나타내는 Table 1을 보면 요구되는 추력이 60[N]임을 알 수 있다⁷⁾. 이를 충족시키기 위한 설계값을 구하고자 한다.

5. Linear Force motor 설계

5.1 공극 자속밀도 계산

식 (1)에서 공극 자속밀도는 포스모터의 추력을 결정하는 대단히 중요한 요소이다. 영구자석에 의한 공극의 자속밀도는 식(13)을 이용하여 구한다.

$$B_g = k \frac{B_r}{\frac{A_g}{A_M} + \frac{\mu_M \delta}{h_M}} \quad (13)$$

공극의 면적과 영구자석의 면적이 같다고 하면 공극의 자속밀도는 잔류자속밀도에 비례하고 영구자석의 높이가 높으면 증가한다. k 는 자기회로 형상에 의한 보정상수로 철심과 공극에서 자기전압강하, 누설 자속 등을 고려한 값이다. 측정과 해석을 통하여 k 를 결정하면 차후 보이스 코일 선형 포스모터를 설계하는데 많은 시행착오를 줄이고 Fig. 1에서 여러 단계의 반복계산을 생략할 수 있다. 보이스 코일 선형 포스모터에서 $A_M \approx A_g$ 이다. 식(13)은 일반적으로 사용하는 식이며 계산시간을 줄이는데 아주 요긴한 방법이나 자기회로에 의한 보정상수 k 가 자기회로의 형상에 따라 달라지기 때문에 해석을 통하여 k 값을 구하고 검증하는 것이 필요하다.

5.2 권선설계

권선설계는 코일의 길이와 권선수, 코일의 단면적을 구하는 과정이다. 역기전력은 식(14)로 나타낼 수 있고, 이로부터 코일길이를 구하면 식(15)와 같다. 코일 1턴의 길이를 구하면 식(16)과 같고, 따라서 권선수 N 은 식(17)로 구해지고, 코일직경과 코일 단면적을 구하면 각각 식(18), (19)와 같다.

$$E = B_g l v_{max} \quad (14)$$

$$l = \frac{E}{B_g v_{max}} \quad (15)$$

$$l_T = \pi d_b \quad (16)$$

$$N = \frac{l}{l_T} = \frac{l}{\pi d_b} \quad (17)$$

$$d_c = \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} \times 2 \quad (18)$$

$$A_c = \frac{I_{max}}{S} \quad (19)$$

5.3 요크 두께의 산정

필요한 추력을 만들기 위한 공극에서 자속은 $\Phi = BA$ 이다. 이 자속이 요크를 통하여 흐르므로 요크가 포화되지 않는 범위에서 최대자속밀도를 정하면 요크의 두께를 정할 수 있다. 요크에서 최대 자속밀도를 B_{ymax} 로 하면 그 때의 자속 Φ 는 식(20)과 같고, 요크의 단면적은 식(21)로 나타낸다. 한편 요크의 단면적은 식(22)와 같고, 코일 보빈의 외경 즉 요크의 내경(d_{yi})과 요크 외경(d_{yo})으로 부터 요크의 두께는 식(24)의 조건을 만족해야 한다.

$$\Phi = B_{ymax} A_g \quad (20)$$

$$A_{yoke} = \frac{\Phi}{B_{ymax}} \quad (21)$$

$$A_{yoke} = \pi \left(\frac{d_{yo}}{2}\right)^2 - \pi \left(\frac{d_{yi}}{2}\right)^2 \quad (22)$$

$$d_{yo} = \sqrt{\frac{A_{yoke}}{\pi} + \left(\frac{d_{yi}}{2}\right)^2} \times 2 \quad (23)$$

$$h_y \geq (d_{yo} - d_{yi})/2 \quad (24)$$

Fig. 4에 설계하고자 하는 선형 포스모터의 단면도를, 그리고 Table 2와 3에 그 제원을 나타낸다.

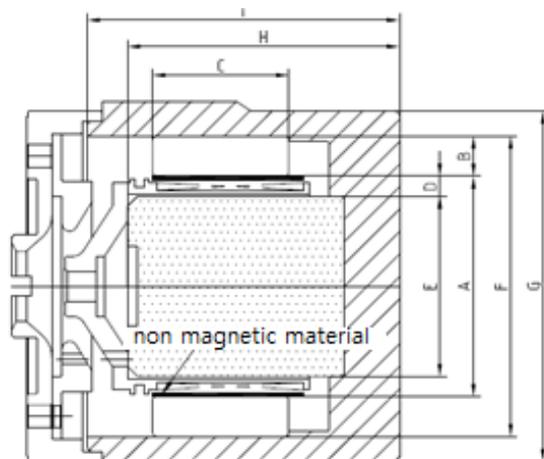


Fig. 4 Cross sectional drawing of the voice coil linear force motor in design

Table 2 The dimensional values in design

Mark	Item	Value[mm]
A	Inner Diameter of Permanent magnet	44
B	Height of Permanent magnet	8
C	Length of Permanent magnet	27
D	Length of Air gap	3.85
E	Outer Diameter of Cylinder	36.3
F	Outer Diameter of Permanent magnet	60
G	Outer Diameter of Force Motor	70
H	Length of Force Motor	54
I	Length of Yoke	62

Table 3 The other design values

Item	Value
Number of Coil turn	330
Diameter of Coil	0.41 [mm]
Diameter of Bobin	37.7 [mm]
Length of Bobin	29 [mm]
resistance of Coil	4.71 [ohm]

6. 보이스 코일 선형 포스모터 해석

식(13)의 방법으로 계산한 공극자속밀도와 식(1)로 계산한 추력을 갖고 Fig. 1의 순서에 따라 설계한 보이스 코일 선형 포스모터의 설계값을 Table 2와 3에 나타낸다. 이를 프랑스 Cedrat사에서 개발한 Program Flux 3D Ver. 10.3을 사용하여⁸⁾ 3차원 유한요소 해석에 따른 전자장 해석을 하고, 각 부위의 자속밀도를 구하여 포화여부를 판단하고 추력을 계산하였다.

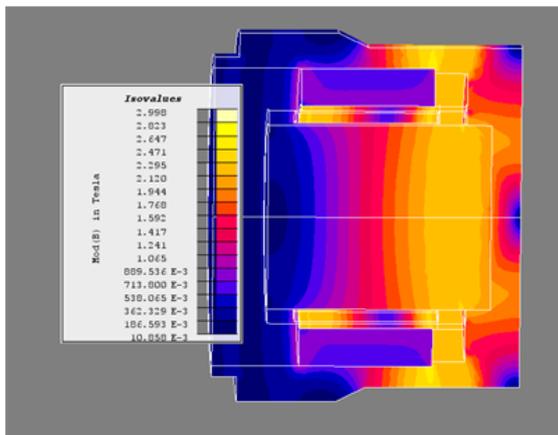


Fig. 5 Flux density of the voice coil linear force motor in design

해석 결과에 따르면 보이스 코일 선형 포스모터는 모든 자속이 Fig. 5에서 보는 바와 같이 오른편으로 모아지므로 설계 시 오른편 요크부위가 포화되는 것을 주의해야한다. 자속밀도가 가장 높은 부위는 자속이 집중되는 실린더와 요크로 2.3~2.4 [T]이다. 이 값은 요크에 사용된 S45에는 다소 높은 값이나 주어진 크기에서 허용할 만한 수치이다.

7. 시작품 보이스 코일 선형 포스 모터 흡인력 실험

유도된 설계값에 따라 시작품을 Fig. 6과 같이 제작하였다. Fig. 7에 추력을 측정하는 시험장치⁹⁾를 나타낸다. 추력측정시험은 선형 포스모터를 밸브에서 분리하여 단독으로 하였고, 스트로크의 변화는 거의 없는 정위치 상태에서 전류를 0~3[A]까지 증가시키면서 인가할 때 발생하는 추력을 로드셀 변환기를



Fig. 6 The manufactured prototype



Fig. 7 The experiment measuring thrusting force

8. 결 론

통하여 읽었다. Table 4에 전류에 따른 힘의 변화를 시험 및 계산, 해석의 결과 값으로 나타내었고, 이를 Fig. 8에 그래프로 나타내었다.

Fig. 8의 해석 값은 Flux를 사용한 시뮬레이션 해석결과로 식(13)에서 보정계수 k 를 구하고 식(1)에서 전류 3[A]를 인가하여 계산한 추력은 62.3[N]으로 산출되었다. 이는 Table 4의 전류 3[A]에서 실험결과의 추력과 비교해 볼 때 2.6%의 오차이므로 포스모터의 해석과 식(13)의 계산이 만족할 만한 결과를 가져왔다고 할 수 있다.

Table 4 The data of thrusting forces

Current [A]	Thrusting Force [N]		
	Measurement	Analysis	Calculation
0.5	8.6	10.5	10.37
1.0	19.0	21.44	20.79
1.5	30.3	32.38	31.13
2	39.8	43.32	41.58
2.5	50.3	54.24	51.87
3	60.4	65.12	62.38

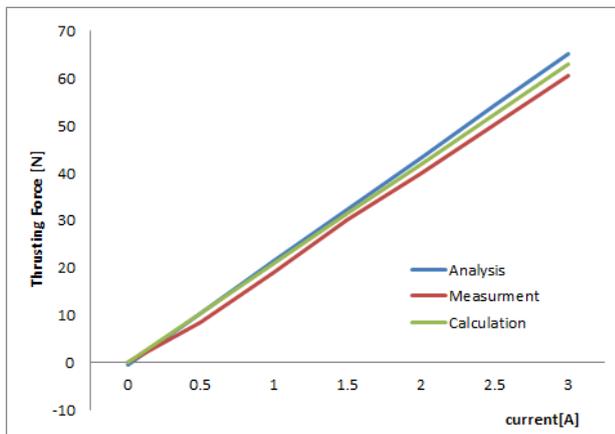


Fig. 8 Curves of the calculated, analysed and measured data of the thrusting forces

Fig. 8에 식(1)에서 사용한 자기회로의 형상에 의한 보정상수 $k=0.83$ 을 적용한 계산 값과 해석 프로그램을 이용한 결과 값 그리고 측정값을 비교하였다. 계산, 해석 그리고 측정에 의한 힘을 비교하면, Fig. 8에서 보는 바와 같이 상당히 근접한 값을 보임을 알 수 있다.

본 연구에서는 고효율 보이스 코일 선형 포스모터를 설계하기 위하여 추력을 결정하기 위한 함수를 정한 뒤에 필요한 공극자속밀도를 계산하고 자속밀도를 만들기 위한 영구자석의 높이를 결정하였다. 그리고 필요한 추력을 만들기 위한 코일턴수와 전류를 계산하였으며 요크의 두께를 계산하고 설계된 선형 포스모터를 3차원 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 해석하였다.

측정값과 해석값으로부터 공극의 자속밀도를 계산하는데 필요한 자기회로 보정상수 k 를 구하였으며 이 값으로 향후 보이스 코일 포스모터를 설계하는데 시행착오를 줄일 수 있게 되었다.

해석결과와 시제품의 실험결과를 비교할 때 오차가 작아 앞으로 비슷한 형상의 선형 포스모터를 설계할 때 본 연구의 설계기술을 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 연구는 2011년도 청정제조기반 산업원천기술개발사업(2단계) 중 고응답형 리니어 액추에이터 방식 유압서보제어기술 개발 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- 1) A. W. Schultz, "Simulation supported Design of electromagnetic Linear actuator for hydraulic Valve." Ph.D. Thesis of RWTH Aachen University 2006.
- 2) M. Reichelt and H. Murrenhoff, "Increasing the Dynamic Load Stiffness of Electrohydraulic Linear Drives" Internal report of Institute for Fluid Power drives and controls RWTH Aachen University.
- 3) J. R. Brauer, Magnetic Actuators and Sensors, Willy-Interscience, 2006.
- 4) S. A. Nasar, Linear electric Motors, Prentice Hall, 1987
- 5) S. M. Jang and S. S. Jeong, H. C. Park, "Design and Extraction of Control Parameter of a Moving-Coil- Type Linear Actuator for Driving of Linear reciprocating Motion Control Systems" Journal of KIEE, 48B-5-3, 1988

- 6) S. M. Jang and C. Kweon, S. S. Jeong, "Special move characteristics of moving coil type Linear Oscillatory Actuator" Trans KIEE 49B-3-8, 2000
- 7) S. S. Park and J. Y. Huh, C. S. Park, "Characteristic Analysis of a Servo Valve using Voice Coil Type Linear DC Motor" Proceedings of KFPS 2011 Spring Conference
- 8) BEI Technologies INC, "Voice coil Actuators an Application Guide"
- 9) C. S. Park, J. Y. Huh, "A study of Analyzing for design of a Linear Force motor for Hydraulic Valve" Journal of KFPS vol. 8 No. 1, 2011