

소비전력 최소화를 위한 전자기 구동기의 권선설계 Power-minimization Coil Design for Single-acting Electromagnetic Actuator

*최원영¹, 유승열¹, #노명규²

*W. Y. Choi¹, S. Y. Yoo¹, #M. D. Noh(mnoh@cnu.ac.kr)²

¹충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단, ²충남대학교 메카트로닉스 공학과

Key words : Magnetic bearing, Power-minimization, Coil winding optimization

1. 서론

자기베어링(Active Magnetic Bearing)은 기존의 저널 베어링과 볼 베어링의 단점들을 보완하기 위한 대체수단으로 비접촉을 지향하기 때문에 소음과 윤활 등의 문제가 발생하지 않는 친환경적인 장치이고, 마찰이 없기 때문에 고속의 회전을 가능하게 해준다 [1]. 이러한 자기베어링은 공작기계분야, 초고속 진공펌프, 터보 분자펌프와 같은 터보기계분야, 자기부상형 인공 심장, 항공우주 산업, 자기부상열차, 반도체 및 나노테크 가공장비, 플라이휠 에너지 저장장치 등 많은 분야에서 연구, 적용되고 있다[2]. 이러한 자기베어링은 개루프 불안정성을 가지기 때문에 항상 폐환제어를 통해 안정성을 확보하는데, 이 때 제어기 및 시스템의 유지 전력이 항상 필요하다. 하지만 자기베어링 시스템의 손실전력은 자기베어링에 권선되어 있는 코일의 동손에서 발생하게 된다.

본 논문에서는 1차원 전자기 구동기의 동손을 최소화하기 위한 권선 설계과정을 정립하였다.

2. 전자기 구동기의 형태 및 구동원리

Fig. 1는 ‘C’형 전자기 구동기의 일반적인 형태를 보여준다. ‘C’자형 코어에 감긴 코일의 횡수를 N_1, N_2 라고 하고, 각 코일에 흐르는 전류를 I_1, I_2 , 코어와 타겟 사이의 공극을 g 라고 할 때, $N_1 = N_2 = N, I_1 = -I_2 = I$ 이라 가정하면, 공극에서의 자화 밀도는 아래와 같이 유도된다.

$$B_g = \frac{u_0 N I}{g} \quad (1)$$

이 때, 코어의 극단면적에서 발생하는 힘은 다음과 같다.

$$F = 2 \cdot \frac{B_g^2 A_g}{2u_0} = \frac{u_0 N^2 I^2 A_g}{g^2} \quad (2)$$

힘 슬루율은 시간에 따른 힘의 변화율을 나타내며 전류의 변화율이 부상체의 움직임에 비해 월등히 빠르다고 가정할 때 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{dF}{dt} = \frac{2u_0 N^2 I A_g}{g^2} \frac{dI}{dt} = \frac{2u_0 N^2 I A_g}{g^2} \frac{V}{L} = \frac{I}{g} V \quad (3)$$

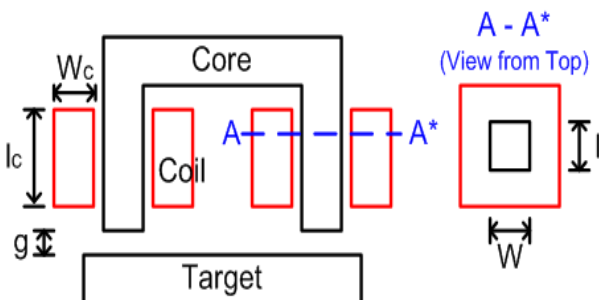


Fig. 1 Geometry of a single-acting 1D actuator

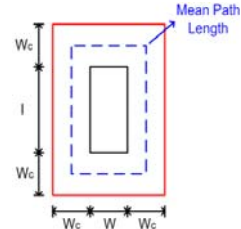


Fig. 2 Cross-section of a core and coil wound

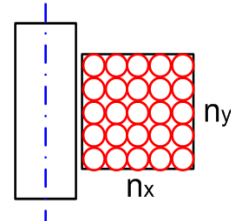


Fig. 3 Coil winding of square pattern

3. 소비전력 최소화를 위한 권선 설계 최적화

전자기 구동기의 소비전력은 권선 저항과 코일 전류에 의해 결정되므로, 설계 파라미터와 권선저항 간의 관계식이 필요하다. Fig. 2는 코일의 단면을 나타내며, 평균 자속 경로의 길이는 식 (4)과 같이 설계 파라미터를 통해 구할 수 있다.

$$l_{mean-path} = 2(l + w_c) + 2(w + w_c) = 2(l + w) + 4w_c \quad (4)$$

코일의 단면에서 구리 부분의 직경을 d_{bare} , 코일 전체의 직경을 d_{wire} 라고 하고, 코일 단면적 A_c 와 실제 전류가 흐르는 면적 간의 비율을 Packing factor f_p 로 정의하면 f_p 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$f_p = \frac{N A_{bare}}{A_c} \quad (5)$$

Fig.3와 같이 사각권선패턴에 대해 수평방향 권선 수를 $n_x \approx \frac{w_c}{d_{wire}}$, 수직 방향 권선 수를 $n_y \approx \frac{l_c}{d_{wire}}$ 라 하면 코일의 총 길이는 다음과 같다.

$$l_{path} = 2n_x n_y (w + l) + 4n_y d_{wire} \frac{(n_x + 1)n_x}{2} \quad (6)$$

$n_x \gg 1$ 라 하면, $(n_x + 1)n_x \approx n_x^2$ 이고

$$l_{path} = 2n_x n_y (w + l) + 2n_x^2 n_y d_{wire} = 2N[w + l + w_c] \quad (7)$$

그러므로 권선 저항은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$R = \rho \frac{l_{path}}{A_{bare}} = \frac{\rho \cdot 2N^2(w + l + w_c)}{f_p A_c} \quad (8)$$

위 설계식에서 볼 수 있는 바와 같이 권선 저항은 설계 파라미터에 의해 결정되며 따라서 권선 저항을 최소화하는 설계파라미터가 존재한다. 이를 구하기 위해 최적화 변수 및 목적 함수, 제한 조건

등을 결정하여야 한다. Fig. 4는 최적화를 통해 결정될 변수들을 나타낸다. 액추에이터의 크기인 w_p 와 l_p , 그리고 코일간의 최소 거리 $w_{coil-sep}$ 이 입력으로 주어지면 최적화 과정을 통해 액추에이터의 크기인 w , 코일 단면적을 결정하는 w_c 와 l_c , 그리고 권선수 N 등이 결정된다. 최적화의 목적함수는 코일 전류에 의한 소비전력으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P = I^2 R = (NI)^2 \bar{R} \quad (9)$$

최적화 과정의 구속조건은 우선 공극 자속밀도가 포화자속밀도 이하인 상태에서 액추에이터의 힘과 힘 슬루율이 요구조건을 넘어야 한다. 또한, 코일 내 전류 밀도가 일정 값 ($600A/cm^2$) 이하이며 전류가 증폭기의 최대값 이하이어야 한다. 이외에 몇 가지 기하학적 구속 조건이 있을 수 있는데, 이를 정리하면 아래와 같다.

- ① $F \geq F_{req}$
- ② $B \leq B_{sat}$
- ③ $\left| \frac{dF}{dt} \right| \geq \left| \frac{dF}{dt} \right|_{req}$
- ④ $l_c \leq l_p - w$
- ⑤ $2w_c + w_{coil-sep} \leq w_p - w$
- ⑥ $J_c \leq J_{max}$
- ⑦ $I \leq I_{max}$

이상의 최적화 과정을 Table. 1과 같은 초기값을 가지는 단방향 1차원 전자기 액추에이터에 적용하였다.

최적화 과정의 결과 값은 Table. 2에 정리되어 있는데 요구부하 용량 F_{req} 에 관계없이 코일 너비나 코일 높이 등은 거의 일정한 최적값을 갖는다.

Table. 1 Initial condition for coil winding design optimization of single-acting 1D electro-magnetic actuator

Parameters	Values	Parameters	Values
g	0.5 mm	w_p	200 mm
l	50 mm	l_p	150 mm
Max current I	10 A	$w_{coil-sep}$	10 mm
Amplifier DC voltage	200 V	f_p	0.5
Required force	910 N	Required force slew rate	1000000 N/s
Saturation flux density	1.2 T	Max current density	6000000 A/m ²

Table. 2 Result of coil winding design optimization of single-acting 1D electro-magnetic actuator

Parameters	Values
w_{opt}	55.5 mm
w_{c-opt}	67.2 mm
l_{c-opt}	94.5 mm
N_{opt}	46.3394 turns
l_{c-opt}	5.5118 A

4. 결론

본 논문에서는 전자기 구동기의 전력최소화를 위해 1차원

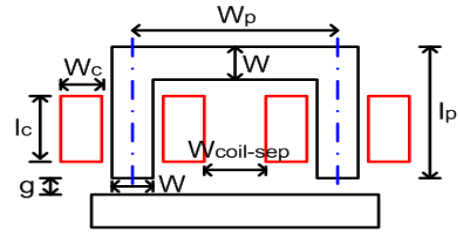


Fig. 4 single-acting 1D electro-magnetic actuator

전자기 액추에이터의 설계식, 권선 저항과 설계 파라미터 간의 상관관계를 도출하였다. 또한, 설계 제한 조건을 파악하여 최적 설계를 수행하였다.

참고문헌

- G. Schweitzer, "Active Magnetic Bearings – Chances and Limitations," Proc. 6th International IFToMM Conference on Rotor Dynamics, 2002.
- Schweitzer and E. H. Maslen ed., Magnetic Bearings, Springer, 2009.