

3상 가변형 셸프 베어링 스텝모터의 제어

김 대 곤*

(2001년 2월 5일 접수, 2001년 9월 15일 심사완료)

Control of a 3-Phase VR Type Self-Bearing Step Motor

Daegon Kim

Key Words: Self-Bearing Motor(셸프베어링 모터), Bearingless Motor(베어링리스 모터), Magnetic Bearing(자기베어링), Step Motor(스텝모터), Self-Bearing Step Motor(셸프베어링 스텝모터)

Abstract

The control algorithm of a new type self-bearing step motor is presented. The motor actuator is used for both motor and bearing functionality without any redundant coil windings or redundant electromagnets. The self-bearing step motor layout and its control method are described. A linearized force-current-displacement relationship is derived. As the result of the unbalance response approach, the constant torque production is possible for the supply current regulation algorithm. And even if the bearing functionality is added in the motor functionality, no additional current for bearing functionality is possible, and this leads to minimize the net power loss. Also, the unbalance response shows the independent bearing force and motor torque.

기호설명

F_n, F_t : 반지름방향과 원주방향 힘
 K_i, K_{ic} : 전류강성
 K_q, K_{qc} : 위치강성
 L : 축방향 길이
 N : 전자석의 다리당 권선수
 T : 토크
 W : 중첩길이
 W_p : 전자석의 원주방향 길이
 W_r : 회전자 피치
 W_{st} : 고정자 피치
 h : 공극
 h_{kj} : 전자석의 기하학적인 중심에서의 공극
 h_s : 정상상태에서의 공극
 i : 전류
 i_x, i_y : 베어링 제어전류

i_k : 공급전류
 i_t : 토크전류
 x, y : 변위
 x_j, y_j : 작동 전자석에서의 변위
 θ_j : 위상차
 μ_0 : 진공에서의 투자율($= 4\pi \times 10^{-7}$)

1. 서론

자기베어링(Magnetic bearing)^(1,2)은 전자석이나 영구자석에 의해 발생하는 자기력을 이용하여 물체를 지지한다. 이러한 자기베어링의 장점으로는 베어링과 물체간의 접촉이 없기 때문에 마모와 마찰에 의한 에너지 손실이 없고 별도의 윤활장치가 필요 없을 뿐더러 유지보수가 거의 필요 없다. 또한, 센서를 이용하여 물체의 위치를 지속적으로 감지하기 때문에 지지된 물체에서 발생하는 진동이나 외부로부터 가해지는 외란에 의한 영향을 어느 정도 제거할 수 있다. 이러한 장점으로

* 회원, 켄터키대학 기계공학과,
E-mail : dgkim0@engr.uky.edu
TEL : (0)1-859-257-4156 FAX : 859-257-3304

인하여 자기베어링은 초고속 회전이 필요한 회전 기계, 인공위성과 같은 극악한 환경조건에서 사용되는 회전기계, 정밀 위치 및 각도 조정이 필요한 기계 등에 응용되고 있다. 그러나 자기베어링은 기계 부품뿐 아니라 전기부품으로 구성되어 있기 때문에 구조적으로 복잡하고 베어링 자체의 부피와 무게가 크고 가격이 상대적으로 비싸다는 단점이 있다.

자기베어링의 자기부상기술은 자기력을 이용한다는 점에서 모터의 작동원리와 비슷하기 때문에 1980년대 중반부터 모터의 액추에이터를 이용하여 모터와 베어링 역할을 동시에 수행할 수 있는 셀프베어링 모터 (self bearing motor, bearingless motor)⁽³⁻⁹⁾에 대한 연구가 시작되었다. 이러한 셀프베어링 모터는 하나의 액추에이터를 이용하여 모터역할과 베어링역할을 동시에 수행하기 때문에 액추에이터 자체의 무게와 부피를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 자기베어링이 가지는 장점을 그대로 유지할 수 있다. 셀프베어링 스텝모터⁽³⁾에 대한 연구로는 고정자 코일에 자기베어링 작용을 위한 코일을 추가로 감아 하나의 액추에이터로 모터역할과 베어링역할을 동시에 수행할 수 있는 설계가 제안된 바 있다.

셀프베어링 스텝모터를 포함한 대부분의 셀프베어링 모터에 대한 지금까지의 연구는 모터링을 위한 코일에 베어링 작용을 위한 코일이나 자석을 추가하는 방법을 사용하고 있기 때문에 일반적인 모터 베어링 시스템과 비교하여 상당히 개선된 구조이지만 모터를 위한 장비와 베어링을 위한 장비를 서로 독립적으로 사용하게 되므로 모터작용을 위한 장비와 베어링작용을 위한 장비가 거의 대부분 필요하게 되고, 이로 인하여 전체 시스템의 부피는 그다지 줄어들지 않게 된다. 최근 들어 모터코일의 권선방법을 약간만 수정해 줌으로써 추가적인 전자석이나 코일 없이 모터 자체의 전자석과 코일이 모터링과 베어링 역할을 동시에 수행할 수 있는 제어방법을 해석 및 실험을 통하여 검증한 바 있다.⁽⁷⁻⁹⁾

본 논문에서는 산업체 모터의 40% 이상을 점유하고 있는 스텝모터를 셀프베어링 스텝모터로 개발하기 위한 새로운 해석 및 제어방법을 소개한다. 특히, 본 논문에서 제시한 제어방법은 베어링 작용을 위한 추가적인 코일이나 추가적인 전자석이 없이 모터자체의 액추에이터를 이용하기

때문에 액추에이터 자체의 부피와 무게를 줄일 수 있을 뿐 아니라, 모터 구동장치를 일부 공유하여 사용하기 때문에 시스템 전체의 부피와 무게도 동시에 줄일 수 있게 된다. 또한, 추가적인 코일에 의한 나타나는 자속의 연성문제를 제거할 수 있기 때문에 베어링작용이 포함되더라도 이에 무관하게 일정한 토크를 얻을 수 있다. 이를 포함하여 본 논문에서 제시한 새로운 형태의 셀프베어링 스텝모터는 기존의 셀프베어링 모터에 대한 연구와 비교하면 다음과 같은 특징이 있다.

- 1) 추가적인 코일이나 추가적인 전자석이 필요 없기 때문에 시스템 전체의 무게와 부피를 최소화 할 수 있다.
- 2) 모터에 베어링작용이 추가되더라도 토크의 크기는 변하지 않는다.
- 3) 베어링작용을 위한 추가적인 전류가 필요 없기 때문에 전력손실을 최소화할 수 있다.
- 4) 제어방법이 간단하다.

이러한 셀프베어링 스텝모터는 정밀 디지털 제어 액추에이터로, 특히 컴퓨터의 데이터 저장 및 출력시스템, 프린터, 복사기, 팩스머신 등 사무기기용; 로봇의 액추에이터, 반도체 제조용 액추에이터, 정밀 테이블, 미사일추적 등 정밀위치제어용; 인공위성, 인공심장 등 특수환경에서 사용되는 액추에이터 등 다방면의 분야에 응용이 될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 이론해석

Fig. 1은 본 논문에서 모델로 사용한 단순한 형태의 가변 킬러턴스형 스텝모터의 개략도를 나타내고 있다. 고정자는 호모폴라형태로 하였으며 고정자의 전자석에는 전자기력을 얻기 위한 코일이 감겨져 있다. 호모폴라형 구조의 특징은 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 자력선이 축 방향으로 발생하여 회전자가 회전하더라도 원주방향으로 고정자의 극의 변화가 없기 때문에 와전류손실(eddy current loss)을 최소화할 수 있다.

상용화 되어있는 스텝모터는 여자의 순서에 따라 같은 상(phase)에 위치한 모든 전자석의 코일(11-21-31-41, 12-22-32-42, ...)이 직렬로 연결되어 있기 때문에 각 코일에는 같은 크기의 전류가 흐르게 된다. 그러나, 본 논문에서 제시한 셀프베어링 스텝모터에서는 모터 자체가 베어링 역할을

수행할 수 있게 하기 위하여 Fig. 1과 같이 고정자의 각 전자석 코일의 연결을 서로 단락 시키고 각 코일을 독립적으로 구동하기 때문에, 같은 상에 위치한 전자석의 코일이라도 공급전류의 크기는 회전자의 편심과 구동전자석에 따라 차이가 난다.

Fig. 2는 본 논문에서 사용된 기호와 전자기력의 발생을 나타낸 그림이다. N은 코일의 권선수, i는 코일에 흐르는 전류, h는 공극, L은 전자석의 축 방향 길이, W는 중첩길이, W_p 는 전자석의 원주방향 길이, W_{st} 는 고정자의 피치, 그리고 W_n 는 회전자의 피치를 나타낸다. 이러한 기하학적인 형상과 전자석의 자기적 특성에 의하여 그림에서 보는바와 같은 반지름방향 자기력 F_n 과 원주방향 자기력 F_t 가 발생하게 된다. 이때 발생하는 전자기력은 자기회로의 개념을 이용하여 다음 식으로 간단하게 표현 할 수 있다.^(1,10)

$$F_n = \frac{\mu_0 L W N^2 i^2}{h^2} \quad (1)$$

$$F_t = \frac{\mu_0 L N^2 i^2}{h} \quad (2)$$

Fig. 3은 고정자와 회전자의 기하학적인 중심이 각 방향으로 x와 y만큼 편심 되고, 상 3이 구동 되었을 때 공극에 따른 자기력의 발생을 나타낸 그림이다. 고정좌표계는 임의로 지정할 수 있지만 본 논문에서는 고정좌표계를 X와 Y 방향 센서가 위치한 곳과 일치시키고 1상의 좌표로 사용 하였다. 여자방법에 따라 구동되는 전자석은 상의 변화에 따라 순서대로 변하고, 이때 회전자의 편심에 의한 공극은 구동된 전자석에서의 공극으로 변환이 되어야 한다. 센서로부터의 X와 Y 방향의 회전자 위치 정보를 이용하면, Fig. 4와 같은 간단한 좌표변환을 이용하여 상의 여자상태가 1, 2, 3 일 때 각 전자석에서의 편심량을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x_j &= x \cos(\theta_j) + y \sin(\theta_j) \\ y_j &= y \cos(\theta_j) - x \sin(\theta_j) \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 첨자 j는 상을 구분하기 위하여 사용 하였으며, θ_j 는 각 상의 위상차를 나타낸다.

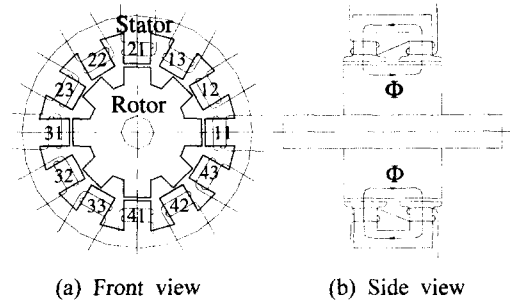


Fig. 1 Schematics of a VM type step motor

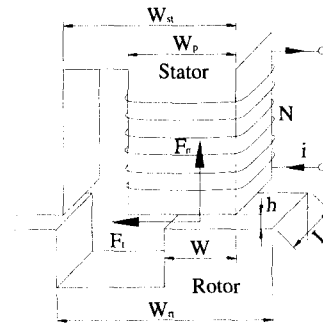


Fig. 2 Geometry of the stator core and rotor teeth

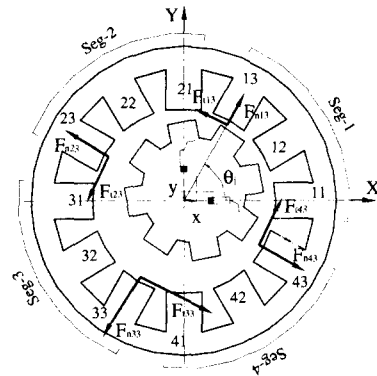


Fig. 3 Airgap change due to the rotor behavior

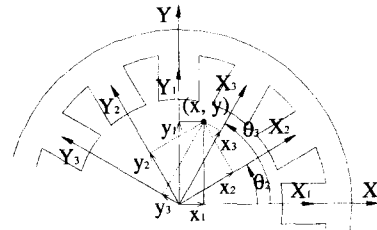


Fig. 4 Coordinates for the phase change

본 논문에서 사용한 모델의 경우 각 상 사이에는 30°의 위상차가 있게 되며, 회전자 편심에 의한 구동된 각 전자석에서의 공극은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} h_{1j} &= h_s - x_j \\ h_{2j} &= h_s - y_j \\ h_{3j} &= h_s + x_j \\ h_{4j} &= h_s + y_j \end{aligned} \tag{4}$$

여기에서 h_{1j} , h_{2j} , h_{3j} , h_{4j} 는 각각 임의의 상이 여자 되었을 때 구동되는 전자석과 회전자 사이의 공극이고, h_s 는 정상상태의 공극을 나타낸다. 이러한 공극의 변화에 따른 전류의 변화와의 관계는 다음과 같은 방법을 이용하였다.

$$\begin{aligned} i_{1j} &= i_t + i_x \\ i_{2j} &= i_t + i_y \\ i_{3j} &= i_t - i_x \\ i_{4j} &= i_t - i_y \end{aligned} \tag{5}$$

여기에서 i_{1j} , i_{2j} , i_{3j} , i_{4j} 는 임의의 상이 여자 되었을 때 각 전자석의 코일에 공급되는 공급전류, i_t 는 모터의 토크전류, 그리고 i_x 와 i_y 는 베어링 작용을 위한 제어전류이다. 상용화되어 있는 스텝모터의 경우 베어링작용이 필요 없기 때문에 식 (5)의 우측의 제어전류 i_x 와 i_y 는 발생하지 않게 되지만 본 논문에서 제안한 셀프베어링 스텝모터는 X와 Y방향으로의 편심을 보상하기 위한 제어전류가 발생하게 된다. 이 제어전류는 한쪽의 전자석의 코일에 흐르는 전류에 더해지는 반면 반대방향에 위치한 코일에는 빼지게 되므로 실제로 베어링작용을 위한 추가적인 전류가 필요 없게 되므로 전력의 손실을 최소화할 수 있다.

식 (1)과 (2)에 식 (3)-(5)를 대입하고 정리하면 회전자와 고정자 사이의 원주방향 중첩 길이의 크기가 W 일 때 각 전자석에서 발생하는 원주방향힘과 반지름방향힘을 구할 수 있다. 본 논문에서는 기하학적으로 대칭인 모델을 사용하였으므로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{n1j} - F_{n3j} &= \mu_0 L W N^2 \left[\frac{(i_t + i_x)^2}{(h_s - x_j)^2} - \frac{(i_t - i_x)^2}{(h_s + x_j)^2} \right] \\ F_{n2j} - F_{n4j} &= \mu_0 L W N^2 \left[\frac{(i_t + i_y)^2}{(h_s - y_j)^2} - \frac{(i_t - i_y)^2}{(h_s + y_j)^2} \right] \\ F_{n1j} - F_{n3j} &= \mu_0 L N^2 \left[\frac{(i_t + i_x)^2}{h_s - x_j} - \frac{(i_t - i_x)^2}{h_s + x_j} \right] \\ F_{n2j} - F_{n4j} &= \mu_0 L N^2 \left[\frac{(i_t + i_y)^2}{h_s - y_j} - \frac{(i_t - i_y)^2}{h_s + y_j} \right] \end{aligned} \tag{6}$$

또한 모터토크는 각 전자석에서 발생하는 원주 방향 자기력의 합에 반지름을 곱함으로써 다음과 같은 방법으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= 2\mu_0 R L N^2 \left[-\frac{(i_t + i_x)^2}{h_s - x_j} + \frac{(i_t + i_y)^2}{h_s - y_j} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(i_t - i_x)^2}{h_s + x_j} + \frac{(i_t - i_y)^2}{h_s + y_j} \right] \end{aligned} \tag{7}$$

식 (6)과 (7)의 우측 항에서 전자석의 반지름방향힘은 전류의 자승에 비례하고 공극의 자승에 반비례하는 비선형성을 가지며, 원주방향힘은 전류의 자승에 비례하고 공극에 반비례하는 비선형성을 나타내게 된다. 그러나, 변위 x 와 y 가 정상상태의 공극 h_s 에 비하여 작고 이에 따른 제어전류 i_x 와 i_y 가 작다는 가정 하에 테일러 전개식을 이용하여 다음과 같이 비선형식을 선형화시킬 수 있다.

$$F(x, y, i_x, i_y) = F_0 + K_x x + K_y y + K_{ix} i_x + K_{iy} i_y \tag{8}$$

$$\begin{aligned} F_0 &= |F_0|_{x=y=i_x=i_y=0} \\ K_x &= \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x=y=i_x=i_y=0} \\ K_y &= \left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_{x=y=i_x=i_y=0} \\ K_{ix} &= \left. \frac{\partial F}{\partial i_x} \right|_{x=y=i_x=i_y=0} \\ K_{iy} &= \left. \frac{\partial F}{\partial i_y} \right|_{x=y=i_x=i_y=0} \end{aligned} \tag{9}$$

식 (8)과 (9)를 이용하여 식 (6)을 선형화시키고 구동전자석에 대하여 X와 Y축의 분력을 구하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$F_{qj} = K_{qx} q_j + K_{ij} i_{qj} \tag{10}$$

여기에서 $F_{qj} = \{ F_{xj} F_{yj} \}^T$ 는 상 j 가 구동될 때 발생하는 베어링힘벡터, $q_j = \{ x \ y \}^T$ 는 변위벡터, $i_{qj} = \{ i_x \ i_y \}^T$ 는 제어벡터, K_{qj} 는 위치강성행렬(displacement stiffness matrix), K_{ij} 는 전류강성행렬(current stiffness matrix)이고 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$K_{qj} = \begin{bmatrix} K_q & -K_c \\ K_c & K_q \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} K_{iq} & -K_{ic} \\ K_{ic} & K_{iq} \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (11)과 (12) 행렬의 각 요소는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$K_q = \frac{4\mu_0 L W N^2 i_t^2}{h_s^3} \quad (13)$$

$$K_{qc} = \frac{2\mu_0 L N^2 i_t^2}{h_s^2} \quad (14)$$

$$K_{iq} = \frac{4\mu_0 L W N^2 i_t}{h_s^2} \quad (15)$$

$$K_{ic} = \frac{4\mu_0 L N^2 i_t}{h_s} \quad (16)$$

식 (13)과 (15)에서 보는 바와 같이 셀프베어링 스텝모터의 강성은 중첩길이 W 의 함수인 것을 알 수 있다.

식 (10)의 결과를 이용하여 질량이 m 인 셀프베어링 스텝모터의 운동방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (17)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_q & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_{ij} \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기에서 상태벡터 $\mathbf{x} = \{ x \ y \ \dot{x} \ \dot{y} \}^T$ 이고 제어벡터 $\mathbf{u} = \{ i_x \ i_y \}^T$ 이다.

비선형 토크에 대한 식 (7)도 같은 방법으로 선형화 시킬 수 있다.

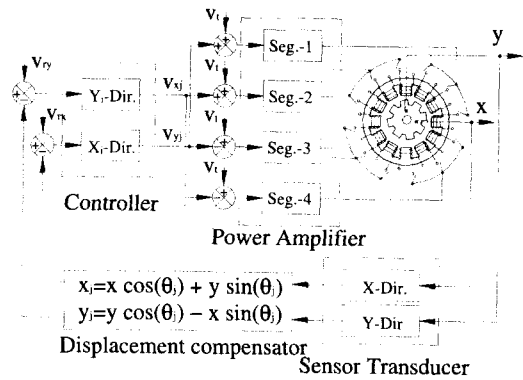


Fig. 5 Self bearing step motor feedback control loop

$$T = \frac{4\mu_0 R L N^2 i_t^2}{h_s} \quad (20)$$

앞의 이론해석을 이용하여 Fig. 5와 같은 피드백 제어회로를 구성하였다. X와 Y방향 변위센서는 회전자의 기하학적인 편심량을 측정하고, 변위보상(displacement compensator)회로에서 상의 여자상태에 따라 구동되는 전자석에 대한 변위로 변환된다. 제어기는 오차신호로부터 회전체의 위치를 보상할 수 있는 베어링작용을 위한 제어전압을 발생하고, 회전자의 위치에 따라 토크전압에 더하거나 감하여진 후 각 코일에 공급되는 공급전류로 바뀌어 구동되는 전자석 코일에 공급되게 된다. 그러므로, 베어링작용이 추가되더라도 모터는 식 (20)과 같은 크기의 일정 토크를 발생하게 된다.

3. 해석결과

앞장의 해석 및 제어방법에 대하여 간단한 예제를 통하여 타당성을 설명하였다. 해석에서는 제어기로 PID 제어기를 사용하였으며, 안정영역의 게인값을 선택하기 위하여 Hurwitz 안정성 판별법을 이용하여 안정영역에 있는 게인을 임의로 선택하여 해석에서 사용하였다. 파워앰프는 비선형성이 없이 1A/V의 게인값을 가지고, 변위센서의 게인은 5000V/m로 가정하여 해석하였다. 해석에서 사용된 변수를 Table 2에 정리하였다.

본 논문의 해석결과는 회전체의 질량중심이 기하학적인 중심에 대하여 $e=10\mu m$ 가량 X축에 대

Table 2 Construction of the self-bearing step motor

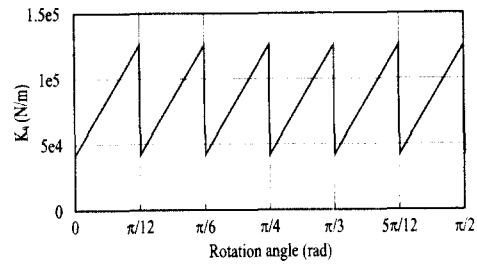
Property	Symbol	Value
Rotor mass	m	1.0Kg
Rotor radius	R	0.02m
Axial length of the actuator	L	0.01m
Steady state air gap	hs	0.0005m
Rotor teeth ratio	$C_r=W_t/W_{tp}$	0.5
Number of coil turns	N	100
Number of the stator teeth	N_s	12
Number of the rotor teeth	N_r	8
Motoring current	i_t	2A
Sensor transducer gain	G_s	5000V/m
Power amplifier gain	G_a	1A/V
Proportional gain	$G_{px}=G_{pv}$	1.0
Derivative gain	$G_{dx}=G_{dv}$	0.0001
Integral gain	$G_{ix}=G_{iv}$	1.0

하여 편심 되어 있고, 회전속도 $\omega=100s^{-1}$ 로 일정하게 회전하는 경우에 대한 결과이다. 해석에서 시스템의 운동방정식 (17)로부터 Adams의 2차 미분방정식 해석방법을 이용하여 축의 다음 단계의 속도와 변위를 구하였다. 해석결과는 X와 Y방향이 90° 의 위상차만 있기 때문에 X 방향에 대한 결과만 나타냈다.

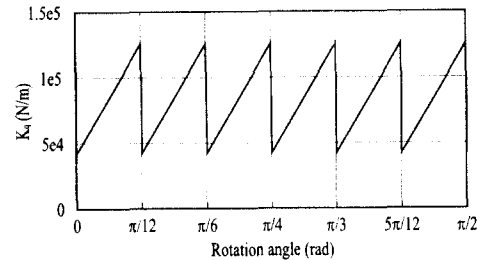
Fig. 6(a)와 (b)는 회전자가 회전할 때 강성의 변화를 나타낸 그림이다. 이러한 강성의 변화는 중첩길이 W의 변화에 의한 현상이다. 변위강성 K_d 의 크기는 최소 4.2×10^4 에서 최대 1.25×10^5 까지 변화하였고, 진류강성 K_i 의 크기는 최소 10.5에서 최대 31.5까지 W의 변화에 따라 선형적으로 변화하는 것을 관찰 할 수 있었다. 이때 연성항 K_{qc} 는 4022N/m, K_{ic} 는 2.01N/A로 W와 무관하게 일정한 값을 나타냈다.

Fig. 7은 회전자가 한바퀴 회전할 동안 축의 편심에 따른 제어전류의 발생을 나타낸 그림이다. 회전자가 회전함에 따라 상의 변화와 원주방향 중첩길이의 변화로 복잡한 제어전류가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 회전자의 불균형질량을 보상하기 위하여 정현파의 파형도 포함되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 모터가 베어링 역할을 하기 위한 제어전류가 한 쪽의 코일에는 더해지는 반면 반대쪽의 코일에는 빼지기 때문에 추가적인 베어링 제어전류가 필요없는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 회전자가 한바퀴 회전할 동안 고정자의 기하학적인 중심에 대한 회전자의 X방향 변위를 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)와 같이 원주방



(a) Displacement stiffness



(b) Current stiffness

Fig. 6 Stiffness variation under rotating unbalance

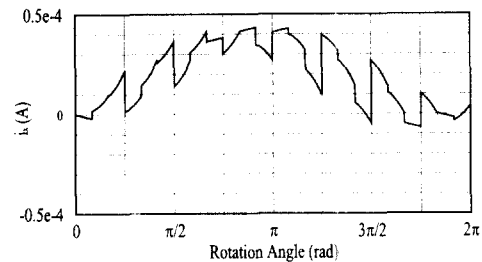


Fig. 7 Bearing control current under rotating unbalance

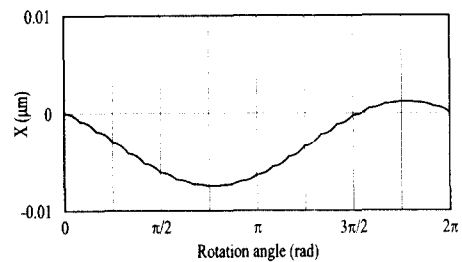


Fig. 8 Displacement response under rotating unbalance

향 중첩길이 W에 따라 위치강성이 변하기 때문에 이에 따른 진동이 발생할 것으로 보이나 (b)에

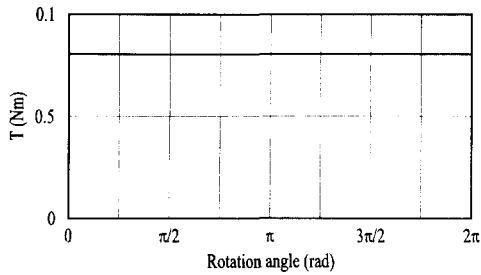


Fig. 9 Torque response under rotating unbalance

서 보는 바와 같이 전류강성도 따라서 변하고, Fig. 7과 같이 회전자의 위치를 보상하기 위한 적절한 제어전류가 발생하기 때문에 회전자는 불균형 질량에 의한 변위만 나타났다. 그림에서 보이는 미소 진동은 상의 변화 때 발생하는 수치계산상의 오차로 보여진다.

Fig. 9는 회전자가 회전하는 동안 발생하는 토크를 나타낸 그림인데 모터가 베어링역할을 동시에 수행하더라도 스텝모터만 구동하였을 때 발생하는 토크와 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 제어전류가 한쪽의 전자석에는 더해지면 반대편의 전자석에는 빼지기 때문에 베어링작용에 상관없이 토크의 크기가 일정한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 고정자의 치수가 12, 회전자의 치수가 8인 3상 가변 릴럭턴스형 스텝모터를 셀프베어링 스텝모터로 개발하기 위한 제어 및 해석방법을 설명하였다. 특히, 추가적인 코일 없이 모터자체의 액추에이터를 이용하여 코일에 흐르는 전류를 적절히 조절해 줌으로써 모터 자체가 베어링역할을 동시에 수행할 수 있는 액추에이터를 쉽게 구현할 수 있음을 해석을 통하여 검증하였다. 또한, 모터에 베어링작용을 추가하더라도 베어링작용을 위한 추가적인 전류가 필요 없기 때문에 전력손실을 최소화할 수 있었으며, 불균형질량 응답을 통하여 토크가 베어링작용에 상관없이 일정하다는 것을 알 수 있었다. 추후 실험을 통한 검증이 수반되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Kim Daegon and Kim Kyungwoong, 1996, "The Influence of Assembling Errors on the Performance of the Rotor Supported by Active Magnetic Bearings," *Journal of KSME*, Vol. 20, No. 12, pp. 3909~3916.
- (2) Kim Daegon and Kim Kyungwoong, 1998, "The Influence of the Machining and Assembling Errors on the Performance of the Shaft Supported by Active Magnetic Bearings," *JSME International Journal*, Series C, Vol. 41, No. 2, pp. 313~320.
- (3) Higuchi, 1987, "Magnetically Floating Actuator Having Angular Positioning Function," US Patent, No. 4683391.
- (4) Bischel, J., 1991, "The Bearingless Electrical Machine," *Proc. International Symposium Magnetic Suspension Technology 91*, NASA Publication 3152, pp. 561~573.
- (5) Chiba, A., Rahman, M.A., and Fukao, T., 1991, "Radial Forces in Bearingless Reluctance Motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 27, pp. 786~790.
- (6) Okada, Y., Miyamoto, S., and Ohishi, T., 1996, "Levitation and Torque Control of Internal Permanent Magnet Type Bearingless Motor," *IEEE Transactions of Control System Technology*, Vol. 4, No. 5, pp. 565~571.
- (7) Stephens, L. S. and Kim Daegon, 1999, "A Segmented Arc Self-Bearing Motor," United States Patent Office-Technical Application, Pending.
- (8) Stephens, L.S. and Kim, D.G., 2000, "Analysis and Simulation of a Lorentz-type, Slotless Self-Bearing Motor," *Proc. of the 1st IFAC Conference on Mechatronics*, pp. 463~468.
- (9) Steele, B.A. and Stephens, L.S., 2000, "A Test Rig for Measuring Force and Torque Production in A Lorentz, Slotless Self Bearing Motor," *Proc. 7th Int. Symposium on Magnetic Bearings*, pp. 407~412.
- (10) Takashi Kenjo, 1984, "Stepping Motors and Their Microprocessor Controls," Oxford University Press, Oxford.