

## 비대칭 3상 가변형 셀프 베어링 스텝모터의 해석 및 제어

### Analysis and Control of an Unsymmetrical 3-Phase VR Type Self Bearing Step Motor

김 대 곤  
(Daegon Kim)

**Abstract :** The analysis and control algorithm of a new type unsymmetrical 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 for bearing functionality. Self bearing step motor layout and control current generation method for unsymmetrical position of electromagnets are described. This new current generation method without additional current for bearing functionality leads to minimize the power loss. As the result of the unbalance response approach, the constant torque production is possible, even though the bearing functionality is added or not.

**Keywords :** self bearing motor, bearingless motor, magnetic bearing, step motor, self bearing step motor, control, unsymmetrical construction

#### I. 서론

본 논문은 회전기계의 일종인 셀프베어링 스텝모터(self bearing step motor)의 해석 및 제어에 관한 것이다. 셀프베어링은 자기베어링(magnetic bearing)기술[1][2]을 이용하여 모터의 액추에이터 자체가 모터역할뿐만 아니라 베어링역할까지 동시에 수행한다는 의미로 베어링리스모터(bearingless motor)라고 부르기도 한다.

자기베어링은 베어링과 물체 사이에 접촉이 없기 때문에 마모 및 마찰에 의한 에너지 손실이 없고, 센서를 이용하여 물체의 위치를 지속적으로 감지하기 때문에 지지된 물체에서 발생하는 진동을 어느 정도 제거할 수 있으며, 유지보수가 필요없이 반영구적으로 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러므로 모터에 자기베어링기술을 적용한 셀프베어링 모터도 회전자가 아무런 기계적인 접촉이 없이 작동하기 때문에 자기베어링이 가지고 있는 장점을 그대로 유지할 수 있다.

셀프베어링 모터에 대한 연구는 1990년대 중반부터 인덕션모터를 중심으로 기계적인 구조, 코일링방법, 제어방법 등을 개선하는 방향으로 급속하게 진행되고 있는 추세이다. 그러나 지금까지 셀프베어링 모터에 대한 대부분의 연구는 모터작용을 위한 코일에 베어링작용을 위한 코일을 추가적으로 감거나 고정자에 베어링 작용을 위한 전자석을 추가적으로 배치하는 방법을 사용하여 왔다[3]-[6]. 이러한 구조는 일반적인 모터 베어링 시스템과 비교하여 상당히 개선된 구조이지만, 모터를 위한 구동장비와 베어링을 위한 구동장비를 서로 독립적으로 운용을 해야하기 때문에 시스템 전체의 부피가 그다지 줄어들지 않게 된다. 최근 들어 모터 고정자의 코일링방법을 약간만 수정해줌으로써 추가적인 전자석이나 코일 없이 모터 자체의 코어와 코일이 모터와 베어링

역할을 동시에 수행할 수 있는 셀프베어링 모터를 해석 및 실험을 통하여 제안한 바 있다[7]-[9].

셀프베어링 스텝모터에 대한 연구로는 고정자 코일에 자기베어링 작용을 위한 코일을 추가로 감아 하나의 액추에이터로 모터역할과 베어링역할을 동시에 수행할 수 있는 설계가 제안된 바 있다[3]. 그러나 다른 형태의 셀프베어링 모터와 마찬가지로 이 제안도 베어링 작용을 위한 추가적인 장비, 구조적인 제한성, 특수한 운전조건 등의 문제점으로 인하여 많은 응용이 되지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 셀프베어링 스텝모터를 실용화하기 위하여 다음과 같은 점들을 극복해야 한다. 첫 번째로 자기부상 기술은 대칭성을 기준으로 물체를 부상시키는 것이 특징이지만, 비대칭구조를 가지는 스텝모터를 셀프베어링 모터로 응용할 수 있어야 하는 것이 해결해야 할 하나의 과제이다. 두 번째로 스텝모터의 여자방법에 따른 구동전자석의 순차적인 이동을 고려하여야 한다. 세 번째로는 고정자의 전자석과 회전자의 치(teeth)가 이루는 중첩길이가 회전자의 회전에 따라서 변하기 때문에 이러한 중첩길이의 변화에 따른 특성을 고려해 주어야 한다. 이러한 문제점들로 인하여 스텝모터가 셀프베어링 모터로 많이 응용되지 못하고 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 비대칭구조의 일반적인 스텝모터에 대하여 액추에이터의 형상을 그대로 유지하고 코일의 연결만 수정한 상태로 스텝모터 자체가 베어링역할을 동시에 수행하게 할 수 있는 셀프베어링 스텝모터에 대한 해석과 이에 따른 제어전류 발생방법을 설명한다. 해석의 편의를 위하여 와전류 손실, 자속의 손실 등이 없다고 가정하였다. 본 연구에서 제안한 방법의 특징으로는 상용화 되어있는 스텝모터를 셀프베어링 스텝모터로 개발할 수 있다는 것과 모터가 베어링작용을 하더라도 베어링 작용을 위한 추가적인 전류가 필요없기 때문에 전력의 손실을 최소화 할 수 있다는 것이다.

셀프베어링 스텝모터는 정밀 디지털 액추에이터, 컴퓨터

의 데이터 저장장치 및 출력시스템, 프린터, 복사기, 로봇의 액추에이터, 정밀 테이블 제어용 액추에이터 등 산업체에서 사용하는 모터의 40% 이상을 점유하고 있는 스텝모터를 셀프베어링 스텝모터로 개발하기 위한 연구이기 때문에 모터 산업 전반에 파급효과가 클 것으로 기대된다. 특히, 정밀 각도 조절이 필수적인 미사일 추적용 액추에이터, 반도체 제조장비, 진공 등 위성체에서 사용되는 액추에이터, 인공심장과 같이 특수 작업환경에서 사용되는 모터 등에도 유지보수가 필요 없이 반영구적으로 사용이 가능하다.

II. 이론해석

Fig. 1은 고정자의 전자석과 회전자 치의 비가 3:2로 구성된 3상 가변 릴럭턴스형 스텝모터의 개략도를 나타내고 있다. 이 구조의 특징은 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 자력선이 축 방향으로 발생하기 때문에 회전자가 회전하더라도 원주방향으로 고정자의 극의 변화가 없기 때문에 와전류 손실(eddy current loss)을 줄일 수 있다.

Fig. 2는 본 논문에서 사용한 기호와 전자기력의 발생을 나타낸 그림이다. N은 코일의 권선수, i는 전류, h는 공극, L은 전자석의 축 방향 길이, W는 원주방향 중첩길이,  $W_p$ 는 전자석의 원주방향 길이,  $W_{st}$ 는 전자석의 피치, 그리고  $W_r$ 는 회전자 치의 피치를 나타낸다. 이러한 기하학적인 형상과 코어의 자기적 특성에 의하여 그림에서 보는바와 같은 반지름방향 자기력  $F_n$ 과 원주방향 자기력  $F_t$ 가 발생한다. 이때 발생하는 전자기력은 자기회로의 개념을 이용하여 다음 식으로 간단하게 표현할 수 있다[1][10].

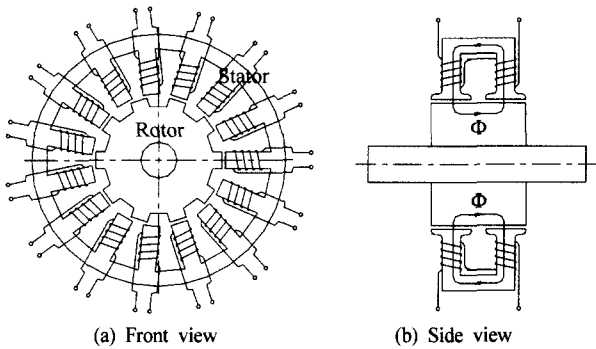


그림 1. 셀프베어링 스텝모터의 개략도.  
Fig. 1. Schematics of a self bearing step motor.

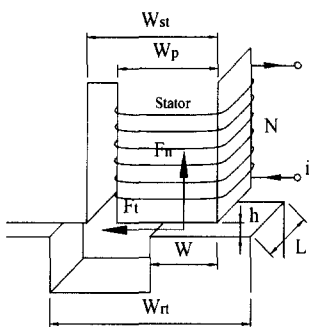


그림 2. 전자석과 회전자 치의 형상.  
Fig. 2. Geometry of the electromagnet and rotor teeth.

$$F_n = \frac{LWB_g^2}{\mu_0} \tag{1}$$

$$F_t = \frac{LhB_g^2}{\mu_0} \tag{2}$$

여기에서  $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ 은 공극의 투자율을 나타낸다.

상용화되어 있는 스텝모터는 여자방식에 따라 같은 상(phase)에 위치한 모든 전자석의 코일에 같은 크기의 전류가 흐르며, 이때 발생하는 원주방향 힘에 의하여 모터의 토크가 발생하게 되므로, 같은 상에 위치한 전자석의 코일이 서로 직렬로 연결이 되어 있는 것이 일반적인 구조이다. 그러나, 본 연구에서는 스텝모터가 베어링역할을 할 수 있도록 하기 위하여 Fig. 1(a)와 같이 각 전자석 코일의 연결을 단락시키고, 구동되는 각 전자석의 토크전류에 베어링작용을 위한 제어전류를 추가할 수 있도록 하였기 때문에 여자되는 상에 따라, 또 같은 상에 위치한 전자석이라도 편심에 따라 각 코일로 공급되는 공급전류의 크기는 차이가 나게 된다.

Fig. 3은 고정자와 회전자의 기하학적인 중심이 X와 Y 방향으로 각각 x와 y만큼 편심 되었을 때 공극의 변화를 나타낸 그림이다. 각 전자석 번호  $P_{jk}$  중 첫 번째 첨자  $j(j=1,2,\dots, N_j)$ 는 상을 구분하기 위하여, 두 번째 첨자  $k(k=1,2,\dots, N_k)$ 는 세그먼트를 구분하기 위하여 사용하였다. 고정좌표계 X축과 Y축은 임의로 지정할 수 있지만, 본 연구에서는 고정좌표계를 X와 Y방향 센서가 위치한 곳과 일치시키고 1상의 좌표로 사용하였다. 코일의 여자상태에 따라 자기력이 발생하는 전자석이 이동하게 되므로 상의 여자상태에 따라 공극도 서로 다른 값을 가지게 된다. 센서로부터의 X와 Y방향의 회전자 위치정보를 이용하면 임의위치에 있는 전자석에서의 공극을 예측할 수 있으며, 회전자의 미소진동에 대하여 다음과 같이 각 전자석의 원주방향으로의 기하학적인 중심에서의 공극을 표현할 수 있다[1].

$$h_{jk} = h_s - x \cos(\theta_{jk}) - y \sin(\theta_{jk}) \tag{3}$$

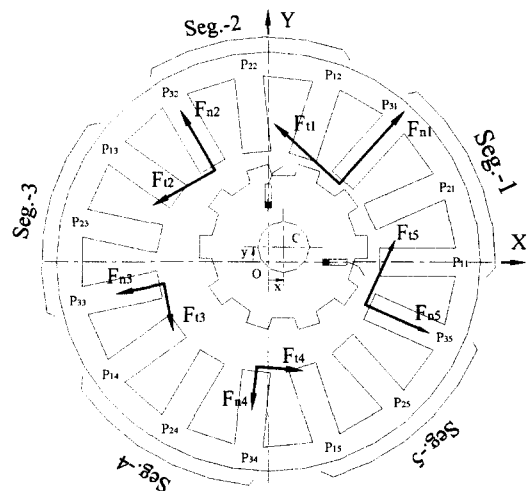


그림 3. 공극과 자기력의 발생 사이의 관계.  
Fig. 3. Relationship between air gap and force generation.

여기에서  $\theta_{jk}$ 는  $j$ 상이 여자될 때 구동되는 각 전자석 사이의 위상차이고, 고정자의 전자석의 수( $N_s$ )에 관계되며  $\theta_{jk} = \frac{2\pi}{N_k}(k-1) + \frac{2\pi}{N_s}(j-1)$ 이라는 기하학적인 특성을 가지게 된다.  $h_s$ 는 고정자와 회전자 기하학적인 중심이 일치하였을 때의 공극을 나타낸다.

제어전류를 발생하기 위한 방법으로는 여러 가지를 생각할 수 있으며 대부분 자기베어링 기술에서 사용되는 방법들은 전자석의 배치가 상하·좌우로 대칭인 구조에 대한 연구가 주를 이루고 있으나, 상용화되어 있는 스텝모터의 경우를 보면 하나의 상이 여자되었을 때 구동되는 전자석이 대칭구조를 가지지 않는 경우도 많이 사용되고 있다. 그러나 각 전자석은 고정자에 고정되어 있고, 회전자에 편심이 있을 때 (3)과 같이 각 전자석의 기하학적인 중심에서의 공극을 알 수 있으므로 이 관계를 이용하여 구동되는 각 전자석에 필요한 제어전류의 크기를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$i_{jk} = i_t + i_x \cos(\theta_{jk}) + i_y \sin(\theta_{jk}) \quad (4)$$

여기에서  $i_{jk}$ 는 상  $j$ 가 여자되었을 때 구동되는 각 전자석에 흐르는 공급전류,  $i_t$ 는 모터작용을 위한 토크전류, 그리고  $i_x$ 와  $i_y$ 는 베어링 작용을 위해 필요한 X와 Y방향으로의 제어전류이다. 일반적인 스텝모터의 경우 모터자체가 베어링작용을 할 필요가 없기 때문에 (4)의 각 전자석에 공급되는 공급전류  $i_{jk}$ 의 크기는 토크전류  $i_t$ 로 일정한 값을 가지게 되지만, 셀프베어링 스텝모터에서는 X와 Y방향으로의 회전자의 편심을 보상하기 위한 제어전류  $i_x$ 와  $i_y$ 가 발생하게 된다. 이 제어전류의 크기는 구동되는 전자석의 기하학적인 각도  $\theta_{jk}$ 에 따라서 (4)의 우측 두 번째와 세 번째항과 같이 표현할 수 있다. 하나의 상이 여자되었을 때 구동되는 전자석은  $N_k$ 개이고, 이때 파워앰프를 통하여 공급되는 전체 전류의 합  $\sum(i_x \cos(\theta_{jk}) + i_y \sin(\theta_{jk}))$ 은 기하학적인 관계로 인하여 0이 되므로 실제로 베어링작용을 위한 추가적인 전류가 필요 없게 된다. 즉, 구동되는 일부 전자석의 토크전류에 베어링작용을 위한 제어전류가 더해지게 되면 나머지 전자석들의 토크전류에는 이와 같은 크기의 제어전류가 감해지기 때문에 베어링작용을 위한 추가적인 전류가 필요없고 전력손실을 최소화할 수 있을 뿐더러, 모터가 베어링작용을 동시에 수행하더라도 토크의 크기에 변화가 없게 된다.

(1), (2)에 (3), (4)를 대입하고 정리하면 회전자와 고정자 코어 사이의 원주방향 중첩길이의 크기가  $W$ 일 때 다음과 같이 전자석  $P_{jk}$ 에서 발생하는 원주방향 힘과 반지름방향 힘을 구할 수 있다.

$$F_{nj} = \mu_0 L W N^2 \frac{(i_t + i_x \cos(\theta_{jk}) + i_y \sin(\theta_{jk}))^2}{(h_s - x \cos(\theta_{jk}) - y \sin(\theta_{jk}))^2} \quad (5)$$

$$F_{tjk} = \mu_0 L N^2 \frac{(i_t + i_x \cos(\theta_{jk}) + i_y \sin(\theta_{jk}))^2}{(h_s - x \cos(\theta_{jk}) - y \sin(\theta_{jk}))^2} \quad (6)$$

반지름방향 힘 (5)는 전류의 자승에 비례하고 공극의 자

승에 반비례하는 비선형성을 가지며, 원주방향 힘 (6)은 전류의 자승에 비례하고 공극에 반비례하는 비선형성을 나타낸다. 그러나 각 방향으로의 변위  $x$ 와  $y$ 가 정상상태의 공극  $h_s$ 에 비하여 작고 이에 따른 제어전류  $i_x$ 와  $i_y$ 도 작다는 가정하에 테일러전개식을 이용하여 다음과 같이 비선형식을 선형화시킬 수 있다.

$$F_{nj} = F_{n0} + 2K_{nq} \cos(\theta_{jk})x + 2K_{nq} \sin(\theta_{jk})y + 2K_{ni} \cos(\theta_{jk})i_x + 2K_{ni} \sin(\theta_{jk})i_y \quad (7)$$

$$F_{tjk} = F_{t0} + K_{tq} \cos(\theta_{jk})x + K_{tq} \sin(\theta_{jk})y + 2K_{ti} \cos(\theta_{jk})i_x + 2K_{ti} \sin(\theta_{jk})i_y \quad (8)$$

여기에서  $F_{n0}$ 와  $F_{t0}$ 는 고정자와 회전자의 기하학적인 중심이 일치하였을 때 발생하는 반지름방향과 원주방향으로의 힘이고,  $K_{nq}$ 와  $K_{tq}$ 는 반지름방향과 원주방향에 대한 위치강성,  $K_{ni}$ 와  $K_{ti}$ 는 반지름방향과 원주방향에 대한 전류강성을 의미하는 상수이며 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F_{n0} = \frac{\mu_0 L W N^2 i_t^2}{h_s^2} \quad (9)$$

$$K_{nq} = \frac{\mu_0 L W N^2 i_t^2}{h_s^3} \quad (10)$$

$$K_{ni} = \frac{\mu_0 L W N^2 i_t}{h_s} \quad (11)$$

$$F_{t0} = \frac{\mu_0 L N^2 i_t^2}{h_s} \quad (12)$$

$$K_{tq} = \frac{\mu_0 L N^2 i_t^2}{h_s^2} \quad (13)$$

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

이와 같이 각 전자석에서 발생하는 반지름방향 힘과 원주방향 힘을 X와 Y방향 분력으로 나누면, 회전자의 편심이  $x$ 와  $y$ 이고 제어전류가  $i_x$ 와  $i_y$ 일 때 각 방향으로의 자기력의 합력을 얻을 수 있게 된다.

$$F_{xj} = \sum_{k=1}^{N_k} (F_{nj} \cos(\theta_{jk}) - F_{tjk} \sin(\theta_{jk})) \quad (15)$$

$$F_{yj} = \sum_{k=1}^{N_k} (F_{nj} \sin(\theta_{jk}) + F_{tjk} \cos(\theta_{jk})) \quad (16)$$

(15)와 (16)에 (7)과 (8)을 대입하고 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{F}_q = \mathbf{K}_q \mathbf{q} + \mathbf{K}_i \mathbf{i} \quad (17)$$

여기에서  $F_q = \{F_x, F_y\}^T$ 는 베어링힘벡터,  $q = \{x, y\}^T$ 는 변위벡터,  $i = \{i_x, i_y\}^T$ 는 제어전류벡터이고, 위치강성행렬(displacement stiffness matrix)  $K_q(2 \times 2)$ 와 전류강성행렬(current stiffness matrix)  $K_i(2 \times 2)$ 는 다음과 같다.

$$K_q = \begin{bmatrix} K_q & -K_{qc} \\ K_{qc} & K_q \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$K_i = \begin{bmatrix} K_i & -K_{ic} \\ K_{ic} & K_i \end{bmatrix} \quad (19)$$

강성행렬의 각 성분은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K_q = N_k K_{nq} \quad (20)$$

$$K_{qc} = \frac{N_k}{2} K_{iq} \quad (21)$$

$$K_i = N_k K_{\text{is}} \quad (22)$$

$$K_{ic} = N_k K_{ti} \quad (23)$$

모터의 토크도 다음과 같은 식으로 간단하게 표현할 수 있다.

$$T = N_k F_{t0} \quad (24)$$

또한, (17)의 결과로부터 회전자에 질량이  $m$ 인 셀프베어링 스텝모터의 운동방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (25)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ K_q/m & -k_{qc}/m & 0 & 0 \\ k_{qc}/m & k_q/m & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ K_i/m & -k_{ic}/m \\ k_{ic}/m & k_i/m \end{bmatrix} \quad (27)$$

여기에서 상태벡터는  $\mathbf{x} = \{x, y, \dot{x}, \dot{y}\}$ 이고 제어벡터는  $u = \{i_x, i_y\}^T$ 이다.

앞의 이론해석결과를 이용하여 Fig. 4와 같은 피드백 제어회로를 구성하였다. X와 Y방향 변위센서는 회전자의 기하학적인 편심량을 측정하고, 기준신호와 비교된 후 각 방향으로의 제어전류  $i_x$ 와  $i_y$ 를 발생하게 된다. 이 제어전류는 전류조절기(Current Regulator)에서 상의 여자 상태에 따라 현재 구동되고 있는 각 전자석으로 공급되는 공급전류를 발생하게 된다.

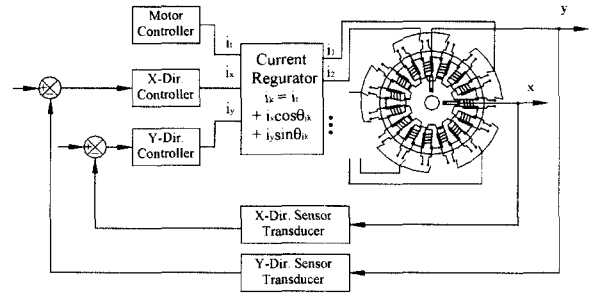


그림 4. 셀프베어링 스텝모터의 피드백루프.  
Fig. 4. Self-bearing step motor feedback control loop.

### III. 해석결과

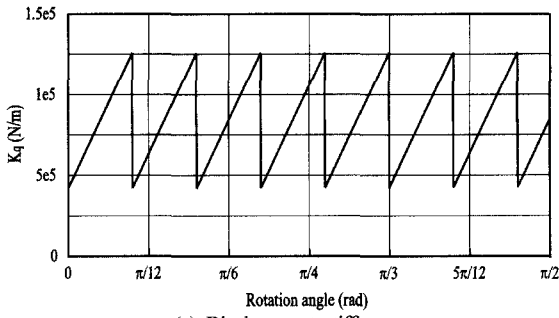
3장에서는 Fig. 1과 같이 고정자의 전자석이 15개, 회전자에 치가 10개로 구성된 3상 가변형 셀프베어링 스텝모터에 대한 예제를 통하여 셀프베어링 스텝모터의 해석 및 제어방법의 타당성을 설명한다.

해석에서는 일반적으로 많이 사용하고 있는 PID제어기를 사용하였으며, Hurwitz 안정성 판별법을 이용하여 안정영역에 있는 계인을 임의로 선택하여 해석에서 사용하였다. 해석에서 사용된 변수 및 제어계인을 Table 1에 정리하였다.

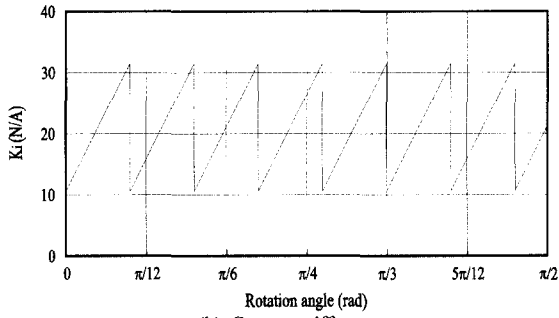
본 연구의 해석결과는 회전체의 질량중심이 기하학적인 중심에 대하여  $e=10\mu\text{m}$ 가량 편심되어 있고, 회전속도  $\omega=100\text{s}^{-1}$ 로 일정하게 회전하는 경우에 대한 결과이다. 해석에서 시스템의 운동방정식 (25)로부터 Adams의 2차 미분방정식 해석방법을 이용하여 축의 다음 단계의 속도와 변위를 구하였다. 해석결과는 X와 Y방향에 90°의 위상차가 있기 때문에 X방향에 대한 결과만 나타냈다.

표 1. 셀프베어링 스텝모터의 제원.  
Table 1. 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	0.01 m
Steady state airgap	hs	0.0005m
Rotor teeth ratio	$C_r = W_r/W_{rp}$	0.5
Number of coil turns	N	100
Number of pole pairs	$N_s$	15
Number of rotor teeth	$N_r$	10
Number of phases	$N_j$	3
Number of segments	$N_k = N_s/N_r$	5
Motoring current	$i_t$	2A
Sensor transducer gain	$G_s$	5000V/m
Power amplifier gain	$G_a$	1A/V
Proportional gain	$G_{px} = G_{py}$	1.0
Derivative gain	$G_{dx} = G_{dy}$	0.0001
Integral gain	$G_{ix} = G_{iy}$	1.0



(a) Displacement stiffness



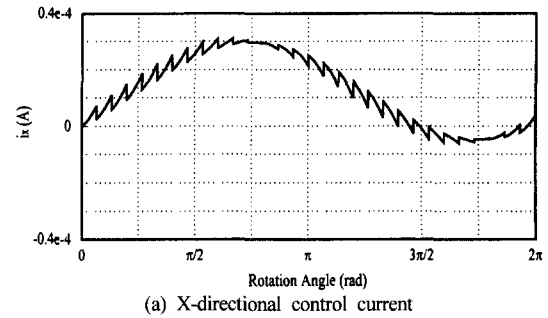
(b) Current stiffness

그림 5. 불균형질량에 따른 강성의 변화.  
Fig. 5. Stiffness variation under rotating unbalance.

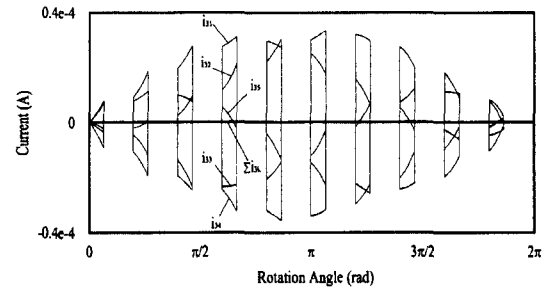
Fig. 5(a)와 (b)는 회전자가 회전할 때 강성의 변화를 나타낸 그림이다. 강성의 주기적인 변화는 고정자 전자석과 회전자 치 사이의 원주방향 중첩길이  $W$ 의 변화에 의한 현상이다. 변위강성의  $K_q$ 의 크기는 최소  $4.2 \times 10^4 \text{N/m}$ 에서 최대  $1.26 \times 10^5 \text{N/m}$ 까지 변화하였고, 전류강성  $K_i$ 의 크기는 최소  $10.6 \text{N/A}$ 에서 최대  $31.5 \text{N/A}$ 까지  $W$ 의 변화에 따라 선형적으로 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 이때 연성항  $K_{qc}$ 는  $5000 \text{N/m}$ ,  $K_{ic}$ 는  $2.5 \text{N/A}$ 로  $W$ 와 무관하게 일정한 값을 가지는 것으로 나타났다.

Fig. 6(a)는 회전자가 한바퀴 회전할 동안 축의 편심에 따른 X방향 제어전류의 발생을 나타낸 그림이다. 제어전류는 회전자의 불균형 질량을 보상하기 위한 정현파 제어전류와 중첩길이의 변화를 보상하기 위한 제어전류가 포함된 신호로 나타난다. Fig. 6(b)는 회전자가 한바퀴 회전할 동안 상 3이 여자되었을 때 5개의 전자석( $P_{31}, P_{32}, \dots, P_{35}$ )의 토크전류에 더해지는 제어전류를 나타낸 그림이다. 이때 원주방향으로 배치된 각 전자석의 기하학적인 관계에 의하여 제어전류가 토크전류에 더해지거나 빼지게 되므로 Fig. 6(b)와 같이 전체적으로 필요한 베어링 제어전류의 합은 0이라는 결과를 얻을 수 있다. 그러므로 모터작용을 위한 전류 이외에 베어링작용을 위한 추가적인 전류가 필요없기 때문에 전력의 손실을 최소화 할 수 있게 된다.

Fig. 7은 회전자가 한바퀴 회전할 동안 고정자의 기하학적인 중심에 대한 회전자의 X방향 변위를 나타낸 그림이다. Fig. 5와 같이 원주방향 중첩길이  $W$ 에 따라 위치강성이 변하기 때문에 이에 따른 진동이 발생할 것으로 보이나 전류강성도 따라서 변하고 이를 보상하기 위한 제어전류의 크기 도 따라서 변하므로 중첩길이의 변화는 회전자의 운동에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그림에서 보이



(a) X-directional control current



(b) Control current flow into each coil at  $j=3$

그림 6. 불균형질량에 따른 베어링 제어전류.  
Fig. 6. Bearing control current under rotating unbalance.

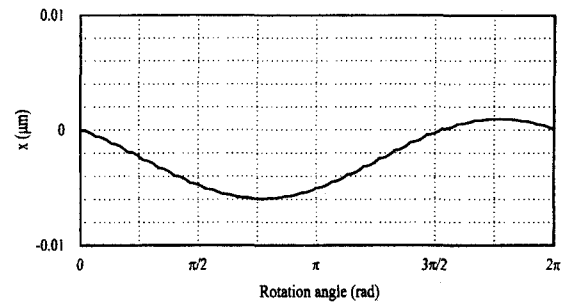


그림 7. 불균형질량에 따른 변위 특성  
Fig. 7. Displacement characteristics under rotating unbalance.

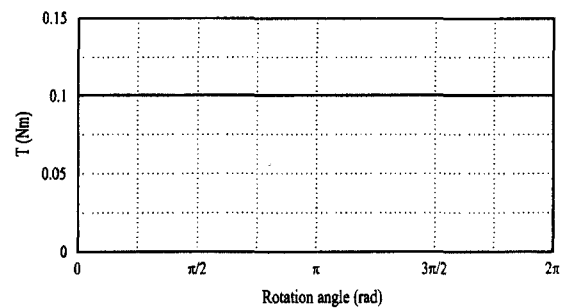


그림 8. 불균형질량에 따른 토크 특성.  
Fig. 8. Torque characteristics under rotating unbalance.

는 미소 진동은 상이 바뀔 때 발생하는 수치계산에서의 오차로 보여진다.

Fig. 8은 회전자가 회전하는 동안 발생하는 토크를 나타낸 그림인데, 본 연구에서 사용한 새로운 제어전류 발생방법과 선형해석 결과에 의하여 모터 자체가 베어링 역할을 동시에 수행하더라도 토크의 크기에는 변화가 없는 것을 볼 수 있다.

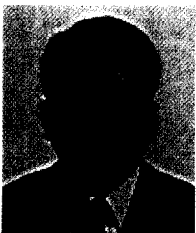
#### IV. 결론

본 연구에서는 상용화되어 있는 비대칭 3상 가변 릴럭턴스형 스텝모터를 셀프베어링 스텝모터로 개발하기 위한 해석 및 제어전류의 발생방법을 설명하였다. 하나의 액추에이터가 모터 및 베어링역할을 동시에 할 수 있도록 하기 위하여 각 전자석의 코일의 연결을 단락시키고 하나의 상이 여자되었을 때 구동되는 각 전자석의 토크전류에 베어링작용을 위한 제어전류를 포함할 수 있게 하였다. 제어전류의 크기는 각 전자석의 원주방향 배치를 이용하여 각 전자석 코일에 흐르는 제어전류의 합이 0이 되도록 하였다.

고정자 전자석의 수가 15이고 회전자의 치의 수가 10인 예제의 해석을 통하여 비대칭구조의 스텝모터도 베어링작용을 위한 추가적인 전력손실이 없이 스텝모터 자체가 베어링역할을 동시에 수행할 수 있음을 검증하였다. 또한, 회전자가 회전할 때 원주방향 중첩길이가 변하기 때문에 위치강성도 선형적으로 변하지만 제어신호에 직접적으로 영향을 주는 전류강성도 따라서 변하고 지속적인 피드백제어가 이루어짐으로 인하여 이러한 중첩길이는 시스템의 성능에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

- [1] Daegon Kim, "The Influence of the machining and assembling errors on the performance of the shaft supported by active magnetic bearings," *PhD. Dissertation, Mechanical Engineering, KAIST*, Aug., 1998.
- [2] Daegon Kim and Kyungwoong Kim, "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, Jun., 1998.
- [3] Higuchi, "Magnetically floating actuator having angular positioning function," *US Patent*, no. 4683391, Jul., 1987.
- [4] Bischel, J., "The bearingless electrical machine," *Proc. Int. Symp. Magn. Suspension Technol. 91*, NASA Publication 3152, pp. 561-573, Aug., 1991.
- [5] Chiba, A., Rahman, M. A., and Fukao, T., "Radial forces in bearingless reluctance motor," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 27, no. 2, pp. 786-790, Mar., 1991.
- [6] Okada, Y., Miyamoto, S., and Ohishi, T., "Levitation and torque control of internal permanent magnet type bearingless motor," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 4, no. 5, pp. 565-571., Sep., 1996.
- [7] L. S. Stephens and Daegon Kim, "A segmented arc self-bearing motor," *United States Patent Office-Technical Application*, (Pending). Sep., 1999.
- [8] Stephens, L.S. and Kim, D. G., "Analysis and simulation of a lorentz-type, slotless self-bearing motor," *Proc. of the 1st IFAC Conf. on Mechatronics*, vol. II, pp. 463-468, Sep., 2000.
- [9] Steele, B.A. and Stephens, L. S., "A test rig for measuring force and torque production in a Lorentz, Slotless self bearing motor," *Proc. 7th Int. Symp. Magnetic Bearings*, pp. 407-412, Aug., 2000.
- [10] Hanselman, D. C., *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*, McGraw-Hill Inc., 1994.



김 대 곤

1963년 5월 31일 출생. 1989년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1993년 한국과학기술원 석사. 1998년 한국과학기술원 박사. 1999년~현재 University of Kentucky Post Doctoral Fellow. 관심분야는 매카트로닉스, 제어공학, 자기부상기술, 셀프베어링모터.