

# 수동형 셀프-베어링 스텝모터의 설계 및 성능해석

## Design and Analysis of a Passive-type Self-bearing Step Motor

곽호성\*·김승종†·최동훈\*\*

Ho-seong Kwak, Seung-Jong Kim, and Dong-Hoon Choi

**Key Words :** Self-bearing motor(셀프-베어링 모터), Passive magnetic bearing(수동형 자기 베어링), Repulsive force(반발력), Halbach Array(할바크 배열)

### ABSTRACT

This paper introduces a new self-bearing motor which combines a homopolar step motor and a passive magnetic bearing. Compared with conventional self-bearing motors which are mostly based on the theory of active magnetic bearings and therefore have some difficulties in design of the complicated flux distribution and control of the levitation force and the torque independently, the proposed self-bearing motor has a very simple and novel structure and operating principle. For the levitation, it works just like passive magnetic bearings which use the repulsive force between permanent magnets. On the other hand, its rotation principle is quite similar to that of a conventional homopolar step motor. In this paper, we introduce the basic structure and the operating principle in detail, and show some results of FEM analysis to predict the performance of the proposed self-bearing motor and further, to get the optimal design parameters.

### 1. 서론

1990 년대 중반부터 활발한 연구가 이어지고 있는 셀프-베어링 모터는 마그네틱 베어링과 모터가 기능적으로 결합되어 일체화된 것으로, 주로 마그네틱 베어링의 기능이 절실히 요구되는 소형 모터 시스템(예: 인공심장)에의 적용을 목표로 하고 있다<sup>(1~3)</sup>. 즉, 기존의 구름 베어링이나 저널 베어링에 비해 탁월한 장점이 있지만, 소형 경량화가 어려운 마그네틱 베어링의 단점을 극복하기 위한 대안으로서 개발된 것이다. 그런데, 이러한 셀프-베어링 모터들은 대부분 능동형 마그네틱 베어링(Active Magnetic Bearing, AMB)의 원리를 이용한 것으로서, 이를 위하여 비접촉 변위 센서와 전류 증폭기가 필요할 뿐만 아니라, 고정자(stator)와 회전자(rotor) 사이의 공극에 부상 제어용 자속(flux)과 회전용 자속이 함께 흐르므로 자속밀도(flux density) 분포를 고려한 제어 시스템 구현이 상대적으로 복잡하다. 이론적으로는 부상력과 회전 토크가 각각의 제어 전류에 의해 독립적으로 제어되지만, 실제 고속 회전 시에는 두 제어전류 사이에 연성 효과(coupling effect)가 발생하므로 회전자의 안정성과 시스템의 신뢰성 개선을 위한 연구가 더 필요하다 하겠다.

이에 본 논문에서는 수동형(passive) 마그네틱 베어링을 적용한 셀프-베어링 모터를 제안하고자 한다. 이와 관련된 대표적 연구사례로서, Jarvik 이 발명한 영구자석 베어링을 이용한 혈류 펌프 시스템<sup>(4)</sup>에서는 두 쌍의 영구자석 사이의 반발력을 사용하여 회전축을 부상시키고, 중앙부에 별도의 모터를 장착하여 축을 회전시킨다. 이러한 구조에서는 부상용 영구자석과 모터 사이의 자속 간섭을 피하기 위해 일정한 거리를 두어야 하므로 시스템의 소형화에 한계가 있고, 시스템 설계 시 영구자석에 의한 자속의 차폐를 고려해야 하며, 모터부에 장착된 회전용 영구자석은 시스템에 음강성(negative stiffness)을 제공하므로 회전 토크를 증가시키려면 양쪽 부상용 영구자석이 함께 커져야 하는 단점이 있다. 이에 비해 본 논문에서 제안하는 수동형 셀프-베어링 모터는 반발 부상용 영구자석의 자속을 회전을 위한 바이어스 자속으로도 활용하는 원리로서, 수동형 마그네틱 베어링 유닛과 모터 유닛이 일체화되어 소형화에 유리한 장점이 있다. 부상력 증가와 자속 차폐효과를 위해 수동형 마그네틱 베어링에는 할바크(Halbach) 배열을 적용하였고, 모터는 호모폴라(homopolar step motor) 스텝 모터와 동일한 구조이지만 반

† 책임저자; 한국과학기술연구원, 트라이볼로지 연구센터  
E-mail : sjongkim@kist.re.kr  
Tel : (02) 958-5610, Fax : (02) 958-5659

\* 한국과학기술연구원, 트라이볼로지 연구센터

\*\* 한양대학교, 기계공학부, 교수

발력을 이용하여 토크를 얻는 것이 특징이다. 본 논문에서는 제안된 수동형 셀프-베어링 모터의 구조와 원리를 자세히 소개하고, FEM 해석을 통하여 실현성 검증 및 특성 해석을 수행하였다.

## 2. 구조 및 구동원리

### 2.1 제안된 시스템의 구조 및 개요

Fig. 1은 제안된 수동형 셀프-베어링 스텝모터의 개략도이며 본 시스템은, 축의 거동을 측정하는 센서나 피드백 제어 루프를 필수적으로 사용하는 기존의 능동형 베어링리스 모터와는 달리, 회전자와 고정자(stator)에 영구자석을 부착하여 서로의 반발력으로써 회전자를 자기 부상시키고, 호모폴라 모터의 구동방법과 유사한 원리로써 축을 회전시키는 것이다. 수동형 베어링리스 모터는 모터와 자기베어링이 일체형이므로 모터 자체의 부피와 무게를 줄일 수 있는 동시에, 영구자석을 이용한 수동형 자기 부상 기술을 이용하므로 기존의 능동 제어형 베어링리스 모터에 비해 제어 시스템이 월등히 간단하고 낮은 전력 손실과 높은 효율, 안전성과 신뢰성이 크게 개선되는 장점이 있다.

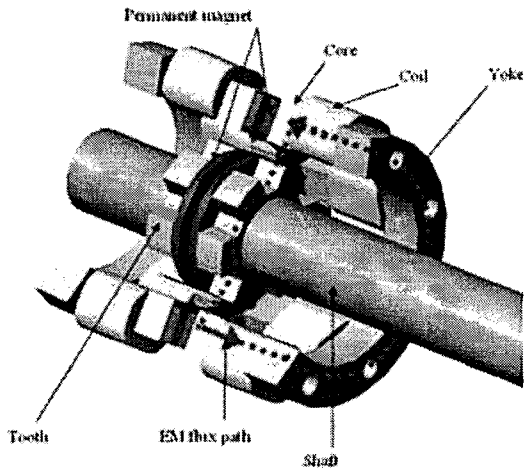


Fig. 1 Prototype of passive self-bearing step motor

### 2.2 할바크 배열의 부상원리

Fig. 2는 수동형 셀프-베어링 스텝모터의 반발원리 특성의 기본구조이다. 보통 1쌍의 영구자석의 반발은, 같은 극성이 서로 마주보고 있는 경우에서 가장 강한 반발특성을 지니지만, 모터의 요크와 같은 철(Fe)과의 접촉상태에는 그 특성이 현저히 떨어진다. 기존의 스텝모터의 기계적 베어링 요소부를 독립적으로 영구자석으로 대체할 수

는 있지만 이 또한 또 다른 자기 베어링 구조요소를 필요로 하기 때문에 크기가 커지며 크기대비 효율성이 기존 베어링보다는 떨어지게 된다. 따라서 고정자의 요크와 접촉을 이루면서도 영구자석의 자속경로를 요크에서 최소화 시킬 수 있는 것이 반발특성을 최대화 하는 설계요인이 된다. 제안된 셀프-베어링 모터에서는 고밀도 자속밀도와 자속의 차폐의 장점을 가진 할바크 배열을 이용하였다.

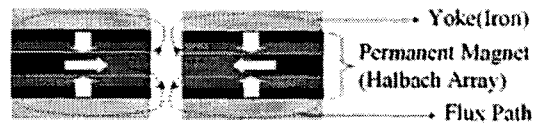


Fig. 2 Basic repulsive structure applied Halbach array

Fig. 3은 수동형 셀프 베어링 스텝모터의 회전자와 고정자에서 영구자석의 배치를 할바크 배열을 적용하여 회전자를 자기부상 시킨 개념도이다. 할바크 배열의 효과는 영구자석의 자속이 분산되지 않고 집중이 되는 경로를 생성시켜, 고밀도의 자속분포를 나타나게 해주며, 배열의 방향과 영구자석의 길이 및 높이비가 자속 밀도에 큰 영향을 준다. 따라서 영구자석의 자속은 요크의 포화자속 밀도(saturation)범위 내에서, 약간의 요크를 포함한 범위 내에서 흐르게 되며, 그 외의 요크에는 무관하게 페루프를 형성하게 된다. 즉 영구자석의 자속이 외부요크로 차폐가 되면서 반발력에 작용하는 자속을 잃지 않고 반발부에 높은 자속 밀도를 형성시켜 큰 반발력을 유지할 수 있다. 따라서 고정자와 회전자의 부상 베어링 효과를 회전자와 고정자 구조 내에서 해결할 수 있으므로 다른 기계적인 베어링 요소부를 필요로 하지 않는 구조이다.

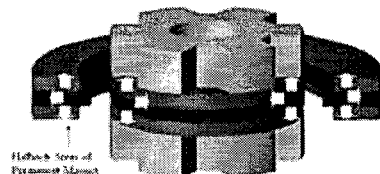


Fig. 3 Concept of Levitation applied Halbach Array.

### 2.3 회전 구동 원리

Fig. 4는 수동형 셀프 베어링 스텝모터의 회전 구동 원리를 나타낸 단면이다. 모터의 회전 원리

는 기존의 호모 폴라형 스텝 모터와 유사하다.

Fig. 3 에서와 같이 축에 3 개의 이 영구자석을 장착하고, 6 개의 이(teeth)를 갖는 회전자 코어를 위, 아래로 위치시키며, 회전자와 반발하기 위한 8 개의 전자석 중 180° 간격으로 배치된 2 개의 전자석이 회전자의 이(영구자석의 할바크 배열로 N 극 형성효과)를 반발시켜 회전을 하고, 또한 회전자가 15° 스텝각을 회전한 후 위 경우와 같은 원리로 작동이 된다. 여기서 고정자와 축에 부착된 영구자석들에 의해 각 공극에서는 단극(homopole) 형태의 자속이 형성되어 있으므로, 전자석에 의한 공극에서의 자속 밀도가 영구자석에 의해 형성된 자속 밀도보다 작은 값을 갖도록 전류를 인가하면, 반발력으로 인한 영구자석의 자속과 전자석에 의한 자속이 중첩이 되어 고정자 코어와 회전자 코어의 극성 효과는 각각 강한 N 극과 약한 N 극의 효과를 지니며 이는 호모폴라 스텝 모터와 유사한 형태가 된다.

180° 간격으로 위치한 회전자의 2 개의 이(teeth)가 고정자의  $\alpha$  상과  $-\alpha$  상에 각각 위치할 경우,  $\alpha$  상의 전자석에 N 극,  $-\alpha$  상의 전자석에 S 극이 형성되도록 전류를 인가하면, 할바크 배열로 인한 영구자석의 자속과 회전자 코어를 따라 흐르는 전자석 자속과의 중첩으로 인하여  $\alpha$  상의 고정자 전자석 코어에는 강한 N 극이, 회전자 코어  $\alpha$  상에는 약한 N 극이 형성되는 효과를 얻는다. 이와 같은 원리로  $-\alpha$  상의 고정자 전자석 코어에는 약한 N 극이, 그리고 회전자 코어  $-\alpha$  상에는 강한 N 극이 형성되는 효과를 얻는다. 즉  $\alpha$  상에서는 고정자 전자석 코어의 강한 N 극이 회전자 코어의 약한 N 극을 반발시키고,  $-\alpha$  상에서는 고정자 전자석 코어의 약한 N 극이 회전자 코어의 강한 N 극을 반발시키는 효과를 얻게 되어 회전자가 15° 회전을 하게 되며 그 이후에는 같은 원리로 회전을 하게 된다.

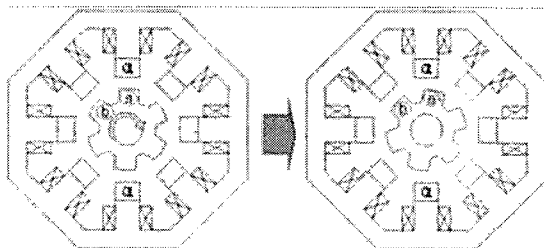


Fig. 4 Basic principle of self-bearing step motor(Unit pulse rotation)

이 경우 각 2 개의 전자석에 인가되는 전류의

크기가 같이 때문에 코어의 6 개의 이(teeth)에 발생하는 수직 방향 힘(normal force)은 서로 상쇄되며, 접선 방향 힘(tangential force)은, 축을 시계 방향으로 15° 씩 회전시킨다. 그리고 고정자에 장착된 전자석의 개수와 축에 장착된 코어의 이(teeth)의 개수를 바꾸어 구성하면, 회전 각도의 분해능(resolution)을 향상시킬 수 있으므로, 고정밀 모터로 제작할 수 있다.

### 3. 시스템 특성 해석 및 성능예측

#### 3.1 시스템 부상 특성 해석

Fig. 5 는 같은 크기를 갖는 영구자석간의 반발 특성을 나타낸 것이며, 철(Fe)이 접촉되어 있을 때 영구자석을 할바크 배열을 적용한 것과, 같은 극성이 마주보는 영구자석의 구조와 반발력의 차이를 나타낸 것이다. 할바크 배열을 적용한 영구자석은 허용된 영구자석의 길이와 높이 비 내에서 크기가 커질수록, 같은 극성이 마주보는 자석구조보다 반발력의 차이가 더욱 커짐을 알 수 있다.

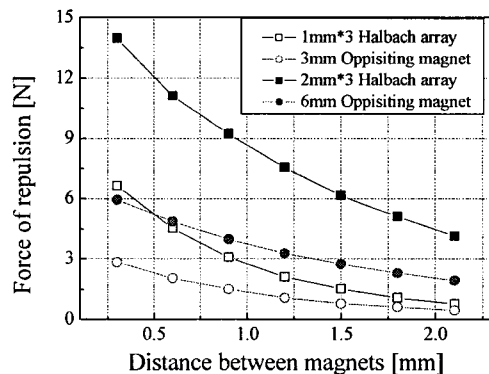
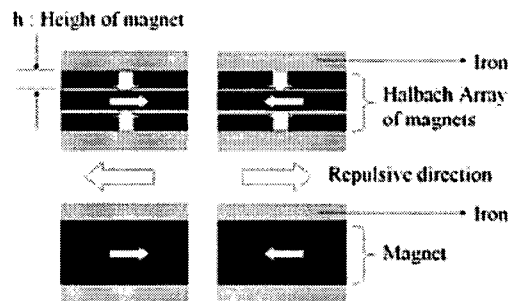


Fig. 5 Repulsive force of Halbach array and Opposite array of P.M.

따라서 위 배열을 기본구조로 하여, 정해진 회

전자의 반경을 기준으로 총 6mm의 자석두께의 설계 구속조건이 주어지고 중앙 영구자석을 중심으로 위, 아래 영구자석의 두께가 대칭을 이룰 때 가운데 영구자석의 두께 대비 위, 아래 영구자석의 두께 비율이 반발력의 크기를 좌우하는 설계요인이 된다.

Fig. 6은 설계공극(1.5mm)에서, 영구자석 두께가 총 6mm로 구속조건이 주어졌을 경우 배열된 영구자석간의 중앙과 위아래 영구자석의 두께비에 따른 반발력의 세기를 나타낸 것이며, 세개의 영구자석의 각각의 두께에 따른 반발력의 크기는 세 영구자석의 두께 비율이 1.7 : 2.6 : 1.7일 때 가장 강한 반발력을 나타나게 된다. Fig. 7은 고정자와 회전자에서 영구자석이 할바크 배열을 이루었을 때 FEM 해석을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 자속 경로가 영구자석과 고정자 및 요크의 일정부분 안에서 폐루프를 형성하고 있기 때문에 영구자석의 반발에 필요한 에너지를 손실하지 않는 장점이 있다.

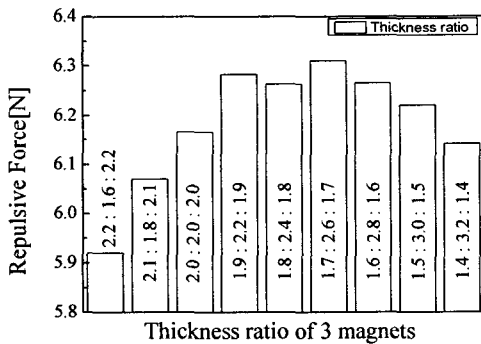


Fig. 6 Repulsive force in thickness ratio of Halbach array P.M.

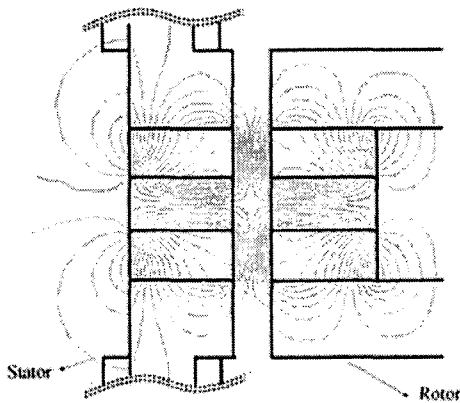


Fig. 7 Repulsive force FEM Analysis of Halbach array of P.M.

Fig. 8은 설계공극이 1.5mm일 때 영구자석의

위아래 접촉된 회전자의 한 슬롯(slot)과 고정자 코어단 한 슬롯 두께에 따른 회전자의 반발력을 나타낸 것이며, 코어단의 두께에 따른 회전자와 고정자의 반발력은 거의 차이가 나지 않는다. 이는 영구자석과 접촉된 부분에서 영구자석 자속이 집중됨을 보이는 현상으로 인하여, 코어단의 두께와는 큰 영향을 미치지 않음을 볼 수 있으며, 이는 코어 사이즈 및 중량을 감소시키는데 큰 의미가 있다.

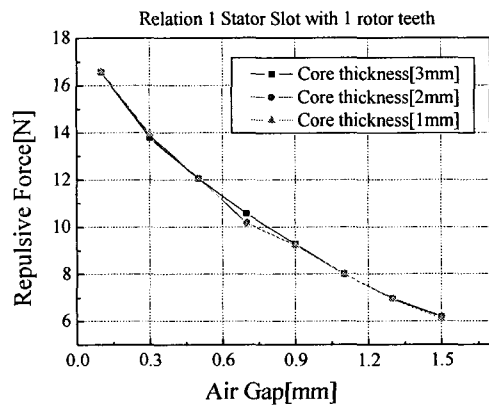


Fig. 8 Repulsive force according as E.M. core height and air gap.(1slot stator magnet and rotor)

Fig. 9는 설계공극이 1.5mm로 가정했을 때 양쪽 고정자들 사이에서 반경방향에 따른 회전자의 부상력을 나타낸 것이며, 그림에서 보듯이, 반경방향으로 치우칠수록 할바크 배열의 특성으로 인한 부상력이 매우 크음을 알 수 있으며, 반발력의 증/감 특성은 선형적임을 알 수 있다. 따라서 반경방향 위치강성계수는 약 9.78 N/mm로써 안정적인 자기부상 특성을 나타낸다.

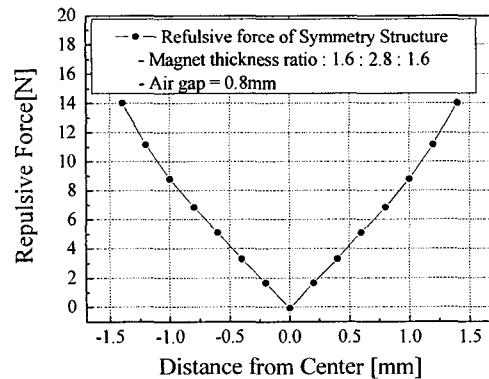


Fig. 9 Radial Direction of Repulsive force in Symmetry Structure

3.2 시스템 구동력 특성 해석

Fig. 4 에서 회전구동 시 회전자 의 이(teeth) a 가  $\alpha$  상에 위치한 경우를  $0^\circ$  라고 했을 때, 회전자 의 이(teeth) b 가  $\beta$  상에 도달했을 때 까지의  $15^\circ$  를  $3^\circ$  간격으로 하여 FEM 해석을 수행하였으며, Fig. 11 은 단위 스텝  $15^\circ$  의 회전토크를 나타낸 결과이다. FEM 해석 시, 공극은 1.5mm, 전자석 코어두께는 3mm, 그리고 최대 반발력을 나타내도록 세 개의 영구자석두께를 각각 1.7mm, 2.6mm, 1.7 mm 로 선정하였다. 또한, 전자석에 의한 공극에서의 자속 밀도가 영구자석에 의해 형성된 자속 밀도보다 작은 값을 갖도록 NI 값을 선정한 결과 전자석의 코일전류는 고정자 슬롯당 100 턴으로 하였고 인가전류는 1A 로 인가하였다. FEM 해석결과  $15^\circ$  에서 최대토크 값으로 시계방향의 회전력을 보임을 알 수 있는데, 이는 회전을 할수록 고정자의 전자석과 회전자 코어의 6 개의 이(teeth)에 발생하는 수직 방향 힘이 서로 상쇄되며, 접선 방향 힘이 점점 증가하는 것을 의미하며, 수동형 셀프 베어링 모터의 부상원리와 동작원리에 부합됨과 가능성을 확인하였다.

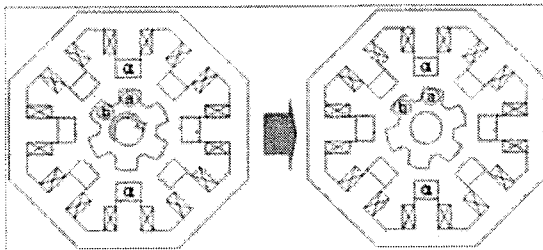


Fig. 10 Torque analysis principle at 3° intervals

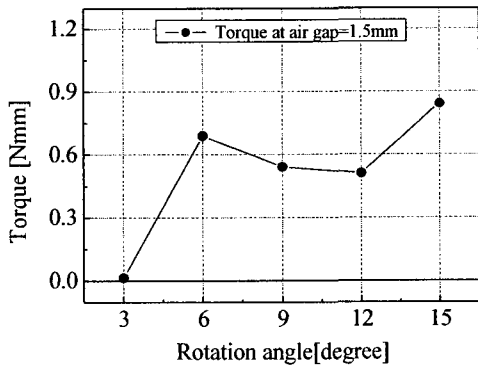


Fig. 11 FEM Torque analysis at 3° intervals

토크에 관해서는 공극의 길이와 회전자 코어가 N 극 효과를 형성하는, 단위 면적에서의 접선방향의 자속밀도의 세기, 그리고 자속밀도 분포의 균

일 정도에 따라 달라지므로 세부설계 시 중요하게 고려되어야 할 변수이다.

3.3 제안된 시스템 특성 분석 및 예측

제안된 수동형 베어링리스 스텝 모터에서, 자기 부상을 위한 반경 방향의 자기력이 안정하게 작용하도록 하기 위해, 축에 부착된 영구자석과 고정자에 부착된 영구자석이 서로 일치하여 마주보지 않도록 축 방향으로 약간 어긋나게 배치되도록 하면, 이 경우 발생하는 축 방향의 자기력,  $F_{PM}$  를 지지하기 위한 스러스트(thrust) 베어링 요소가 필요하게 된다. Fig. 12 은 수동형 셀프 베어링 스텝 모터를 축 방향으로 지지하기 위해 필요한 스러스트 베어링을 장착한 모터와, 스러스트 베어링 역할을 하는 기계적 점접촉 방식(축의 한 쪽 끝단의 형상을 뾰족하게 하여, 하우징에 고정되어 있는 오목한 형상의 내면에 점접촉이 되는 구조)의 개략도이다. 이 경우 자기 부상을 위한 어떤 제어도 불필요하다는 장점이 있으나, 고속 회전 시 점접촉에서의 마찰, 마멸 문제와 수동형 부상의 단점인 낮은 감쇠 문제는 피할 수 없다.

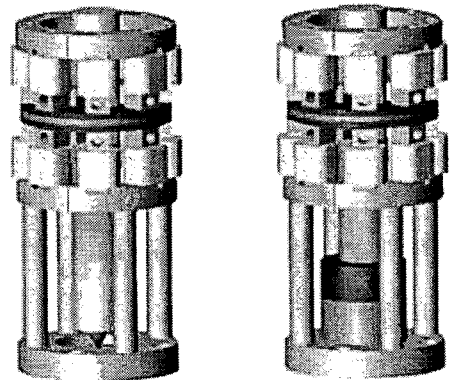


Fig. 12 Motor supported Thrust bearing and point contact component for axial control

이때 능동 자기베어링을 스러스트 베어링으로 하면 이 자기력,  $F_{PM}$  와 방향이 반대이면서 동일한 크기를 갖는 힘,  $F_{AMB}$  는 스러스트 베어링 역할을 하는 능동 자기베어링에 의해 만들어지므로 능동 자기베어링을 스러스트 베어링으로 사용할 경우,  $F_{AMB}$  를 발생시키기 위한 별도의 시스템과 추가적인 제어 전류가 필요하다. 그러나 이러한 구조는 반경 방향과 축 방향 모두 완전 비접촉 부상이 가능하므로, 마찰, 마모 및 윤활이 필요 없는 장점이 있다.

또한 축이 축 방향으로 이동한 위치에 따라, 고정자와 축에 장착된 코어 사이의 공극에 형성되는 영구자석의 자속이 변하게 된다. 이는 곧, 모터의 반경 방향 강성에 영향을 주어 모터의 고유 진동수(natural frequency)를 변하게 한다. 따라서 슬러스트 베어링으로 사용하는 능동 자기베어링의 입력 전류의 크기를 조절하여, 축의 축 방향 위치를 조절함으로써 모터 시스템의 고유 진동수를 변하게 하여, 모터의 속도를 변화시킬 때 공진 현상을 피할 수 있는 장점이 있다.

#### 4. 결론

이상에서와 같이 일반적인 구조의 호모폴라 스텝 모터에, 할바크 배열이 적용된 영구자석구조의 반발력을 이용한 수동형 자기 부상 기술을 융합하여, 기존의 능동 제어형 셀프 베어링 모터에 비해 제어 시스템이 월등히 간단하고 낮은 전력 손실과 높은 효율, 안전성과 신뢰성이 크게 개선됨과 동시에, 모터 자체의 부피와 무게를 줄일 수 있는, 모터와 자기베어링이 일체형인, 수동형 베어링리스 스텝 모터의 제작이 가능하다.

그 효과로서, 축의 부상 제어를 위한 전력의 손실이 없고, 이를 위한 복잡한 제어나 부수장치들이 필요 없으므로 소형으로 제작이 가능하며, 또한 마찰, 마모 및 윤활이 필요 없으므로 수명이 길고, 저전력, 고정정 환경에서 구동될 수 있다. 예를 들면 인공심장용 소형 모터로의 활용이 가능하고, 베어링 소음이 없으므로 저소음 고효율 팬 등으로도 적용이 가능하므로, 산업적 파급 효과가 대단히 클 것으로 판단된다. 현재 셀프-베어링 스텝모터의 동작 특성에 관한 FEM 해석과 세부설계에 관한 연구가 진행 중이다.

#### 참고문헌

- (1) 김승중, Okada, Y., 2001, 소형 수직형 축류 펌프를 위한 축방향 자기 부상 모터, 한국소음진동공학회 논문집, 제 11 권, 제 6 호, pp. 223~232.
- (2) 김승중, Okada, Y., 2001, 소형 원판형 하이브리드 자기 부상 모터, 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 8 호, pp. 338~348.
- (3) 김승중, Okada, Y., 2002, 새로운 권선법을 이용한 4극 로렌쯔형 자기 부상 모터, 한국소음진동공학회 논문집, 제 12 권, 제 1 호, pp. 73~81.
- (4) Jarvik, R., Artificial hearts with permanent magnet bearings, U. S. Patent, No. 5507629.
- (5) Paker, Rollin J., 1990, Advances in permanent magnetism, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (6) Edwin P. Anderson and Rex Miller., 1991, Audel Elecric Motors, Macmillan, New York.
- (7) M. McCaig and A. G. Clegg, Permanent Magnets in Theory and Practice. New York: Wiley,
- (8) J-P. Yonnet, "Passive magietic bearings with permanent magnets", IEEE Trans. Magn., vol. 14, pp. 803-805, Sep. 1978
- (9) J-P. Yonnet, "Permanent dagnet bearings and couplings" IEEE
- (10) Amrhein, W., Silber, S. and Nenninger, K., "Levitation forces in bearingless permanent magnet motors? IEEE transactions on magnetics, v.35 no.5 pt.2, 1999, pp.4052-4054
- (11) de Medeiros, L.H.,Reyne, G.,Meunier, G.,Yonnet, J.P. "Distribution of electromagnetic force in permanent magnets", IEEE transactions on magnetics, v.34 no.5 pt.1, 1998, pp.3012-3015
- (12) Wang Baoguo, Wang Fengxiang, "Modeling and Analysis of Levitation Force Considering Air-gap Eccentricity in A Bearingless Induction Motor," Proc. of the fifth International Conference on Electrical Afachine and Systems, pp. 934-937, 2001.
- (13) Heng, Nian ; Yikang, He ; Yuan, Zhou, "Analytical Modeling of the Magnetic Levitation Force for a Inset Permanent Magnet Type Bearingless Motor", Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on, 2005 v.2, 2005, pp.893-897