

호모폴라형 자기베어링의 특성 해석

장 석명, 권 정기, 조 한욱, 유 대준  
충남대학교

Characteristic Analysis of Homopolar Magnetic Bearing

Seok-Myeong Jang, Jeong-Ki Kwon, Han-Wook Cho, Dae-Joon Yoo  
Chungnam National Univ.

**Abstract.** - The magnetic bearing is an important element for high-speed system, such as semiconductor equipment and machine tools. Particularly, The homopolar magnetic bearing has the advantages of lower power losses, more space for heat dissipation and coil winding. This paper deals with analysis and comparison of the homopolar magnetic bearing according to four different PM structures. On the basis of these results, we find one homopolar magnetic bearing superior to the others. Finally, this paper derive force characteristic equation for this model and deals with comparison of between analytical and FE results.

1. 서 론

자기베어링 시스템은 주축계를 부상시켜 동작시키므로 기계적인 마찰, 마모가 없으며 에너지 손실이 적고 수명이 반영구적이면서 윤활이나 밀봉의 필요성이 없어 진공이나 부식성 대기 및 광범위한 온도에서 사용할 수 있다. 또한 비접촉식 베어링이어서 최대 허용속도를 매우 높일 수 있으며, 전기적인 제어가 가능하여 회전축의 회전 정밀도를 고정도로 유지할 수 있는 장점을 가지고 있다. [1][2] 특히 호모폴라형 자기 베어링은 정하중지지 능력을 영구자석이 담당하게 하고, 전자석으로는 제어력만을 발생시키는 것으로 에너지 소비를 최소화하는 방법이다. 하지만 영구자석을 사용하므로 능동형 자기베어링에 비교하여 제작 비용이 상승하는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 호모폴라형 자기베어링의 장점을 능동형이나 수동형에 대하여 비교 설명하고, 영구자석의 삽입 형태에 따른 자기베어링을 유한요소해석하여 영구자석 제작당 공극자속밀도 및 힘밀도를 비교하고자 한다. 또한 최적의 호모폴라형 자기베어링에 대하여 자기동가 회로법에 의하여 힘 특성식을 유도하여 제어기 설계에 기초를 확립하고자 한다.

2. 호모폴라형 자기베어링의 전자기적 특성

2.1 호모폴라형 자기베어링의 특성 비교

자기베어링은 능동 제어 유무에 따라 능동형(AMB)과 수동형(PMB), 호모폴라형(HMB)으로 구분된다. 능동형 자기베어링은 정하중지지 능력과 제어를 모두 전자석에 의해 이루어 지며, 수동형 자기베어링은 영구자석간의 반발력이나 흡인력을 이용하여 축방향 또는 반경방향에 대해 부상력을 얻는 방식이다. 능동형 자기베어링의 경우 정하중지지 능력을 얻기 위한 바이어스 전류와 제어 전류가 필요하므로 전력 소비가 많은 단점을 가지고 있으며, 수동형 자기베어링은 영구자석의 배치를 어떠한 방법으로 하여도 전체 축이 안정한 부상은 실현할 수 없다는 언쇼우의 정리에 따라 제어를 위한 자기 베어링이 필요하다. 따라서 능동형과 수동형 자기베어링의 단점을

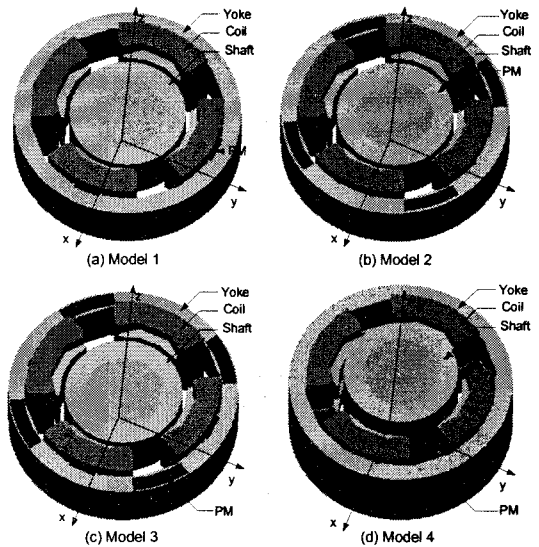


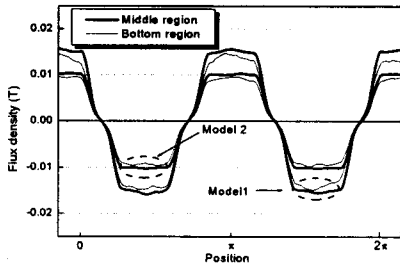
그림 1 호모폴라형 자기베어링의 구조

보완하기 위하여 호모폴라형 자기베어링이 연구되었다. 호모폴라형 자기 베어링은 정하중지지 능력을 영구자석이 담당하게 하고, 전자석은 제어력만을 발생시키는 것으로 전력 소비를 최소화하는 방법이다.

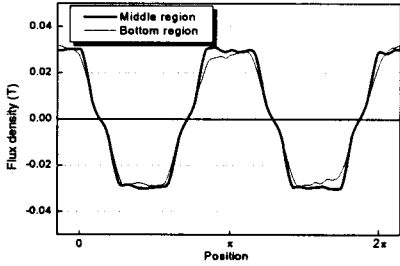
그러나, 호모폴라형 자기베어링은 영구자석을 사용하여 정하중지지 능력을 얻기 때문에 제작 비용이 상승하는 단점을 가지고 있다. 따라서, 영구자석의 형태와 사용량에 따른 공극자속밀도 및 힘밀도를 비교하여, 적합한 형태의 자기베어링을 선택하는 것이 선행되어야 한다.

2.1.1 호모폴라형 자기베어링의 구조

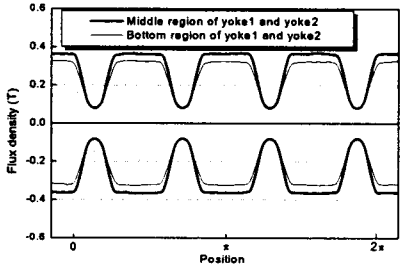
그림 1은 영구자석의 형태에 따른 호모폴라형 자기베어링을 보여주고 있다. 그림 1(a)는 영구자석을 치 부분에 매입한 형태이고, 그림 1(b)는 요크 부분에 매입한 형태이다. 그림 1(c)는 그림 1(a)와 (b)의 형태를 중첩하여 사용한 것이고, 그림 1(d)는 일반적인 호모폴라형 자기베어링을 도시한 것으로 2층 구조의 프레임에 갖고 있으며, 그 사이에 영구자석을 삽입한 형태이다. 그림 1의 (a), (b), (c)는 4극 구조를 갖는 형태로 영구자석이 자화되어 있으며, (d)는 z-방향으로 자화되어 있어 8극 구조를 갖는 모델이다. 영구자석의 사용량에 따른 특성을 확인하기 위하여 그림 1에 제시한 네 가지 모델에 대하여 동등한 사양의 자기베어링을 사용하였으며, 사용한 재질의 투자율 및 도전율을 같게 하였고, 해석 모델에 대하여 공극길이를 일정하게 하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 2 자기베어링의 방사방향 공극자속밀도 (a) Model 1,2 (b) Model 3 (c) Model 4

### 2.1.2 호모폴라형 자기베어링의 특성

그림 2는 그림 1에 제시된 호모폴라형 자기베어링의 반경방향 공극자속밀도를 도시하고 있다. 그림에서의 공극자속밀도는 바이어스 자속에 의한 공극자속밀도이며, 각각의 그림에서 축방향으로 공극의 중간 영역과 단부 영역을 나누어 도시하여 단부효과에 의한 자속밀도의 변화를 확인할 수 있다.

표 1 자기베어링 모델의 100%기준 특성 비교

Model	Air-Gap Flux Density	Flux Density per Magnet Volume	Force Density with Bias Flux	Force Density per NI
Model 1	Low	Low	Low	Low
Model 2	High	High	High	High
Model 3	High	High	High	High
Model 4	High	High	High	High

표 1은 비교 모델에 대하여 공극자속밀도, 영구자석 체적당 공극자속밀도, 바이어스 자속에 의한 힘밀도 및 컨트롤 전류당 힘밀도를 각각 100% 기준으로 하여 도시하고 있다. 표에서 알 수 있듯이 모델 4의 전자적 특성이 다른 모델에 비하여 우수한 것을 확인할 수 있다. 특히 바이어스 자속에 의한 힘밀도가 다른 모델에 비하여 매우 우수한 경향을 보이고 있다. 이것은 축이 외력에 의하여 변위되었을 때, 이를 복원시키려는 컨트롤 전류가 다른 모델에 비하여 많이 필요하다는 것과 요구되는 지지력의 범위가 넓다는 것을 의미한다. 하지만 컨트롤 전류당 힘밀도가 우수하므로, 요구되는 지지력의 범위에서 사용 전력을 최소화 할 수 있는 모델이다. 따라서 이 모델에 대하여 힘 특성식을 유도하고자 한다.

### 2.2 힘 특성식 및 전압 방정식

자기베어링의 해석은 일반적으로 맥스웰 방정식을 이용한 전자장 해석법을 사용한다. 하지만 본 논문의 해석 모델은 복잡한 형상을 가지고 있으므로 전자장 해석으로는 과도한 미분방정식을 풀어야 하는 부담이 있다. 따라서, 3차원 자기등가회로법을 이용한 해석을 하고자 한다. 하지만, 자기등가회로법은 누설 자속, 프린징 및 와전류 영향등을 고려할 수 없으므로 보정 계수를 사용하였다.[4]

#### 2.2.1 호모폴라형 자기베어링의 특성식

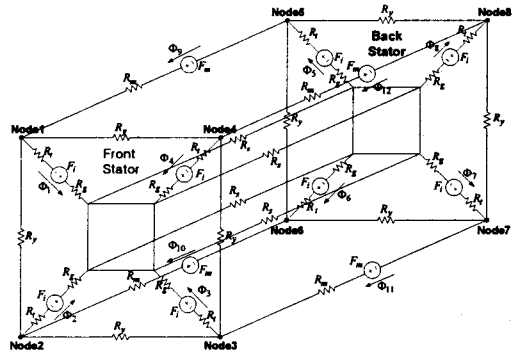


그림 3 해석 모델의 자기등가회로

그림 3은 그림 1에서 제시된 모델 4의 자기 등가 회로이다. 그림에서 자속 경로에 따라 릴럭턴스가 도시되어 있으며, 영구자석 및 코일에 의한 기자력이 각각  $F_m$  및  $F_i$ 로 도시되어 있다. 그림 3에서 자기 베어링의 고정자와 회전자의 자속 경로에 따른 릴럭턴스는 식 (1)과 같다.

$$R_i = \frac{l_i}{\mu_r A_i} \quad (i = y, t, s) \quad (1)$$

여기서 첨자  $i$ 는 각각 요크와 치, 회전자 철심을 의미하며,  $l_i$ 는 두 극 사이의 등가 길이이고,  $A_i$ 는 등가 단면적을 의미한다. 또한 공극의 릴럭턴스는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$R_g = \frac{g_0 g_j}{\mu_0 A_g} \quad (2)$$

여기서  $g_j$ 는 식 (3)과 같다.

$$g_j = 1 - \hat{x} \cos \theta_j - \hat{y} \sin \theta_j \quad (3)$$

여기서 회전자 변위를 의미하는 첨자는 각각  $\hat{x} = dx/g_0$ ,  $\hat{y} = dy/g_0$ 이다. 암페어의 주회적분 법칙, 가우스의 법칙, 자속 보존의 법칙을 적용하여 그림 3의 자기등가 회로에 대한 행렬식이 식 (4)와 같이 표현된다.

$$[R][\Phi] = n[M][I] + [F_m] \quad (4)$$

릴턴스 행렬식은 식 (5)와 같다.

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{12} & -R_2 & 0 & -R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_1 & -R_2 & 0 & 0 \\ -R_2 & R_{23} & -R_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 & -R_3 & 0 \\ 0 & -R_3 & R_{34} & -R_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & -R_4 & 0 \\ -R_1 & 0 & -R_4 & R_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_1 & 0 & 0 & 0 & R_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{12} & -R_2 & 0 & -R_1 & -R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_2 & R_{23} & -R_3 & 0 & 0 & -R_2 & R_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_3 & R_{34} & -R_4 & 0 & 0 & -R_3 & R_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_1 & 0 & -R_4 & R_{41} & R_1 & 0 & 0 & 0 & R_4 \\ R_1 & 0 & 0 & -R_1 & -R_1 & 0 & 0 & R_1 & R_{m1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_2 & R_2 & 0 & 0 & R_2 & -R_2 & 0 & 0 & 0 & R_{m2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_3 & R_3 & 0 & 0 & R_3 & -R_3 & 0 & 0 & 0 & R_{m3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_4 & R_4 & 0 & 0 & R_4 & -R_4 & 0 & 0 & 0 & R_{m4} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 각 변수는 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} R_i &= R_{gi} + R_i \\ R_{ij} &= R_y + 2R_i + R_{gi} + R_{gj} \\ R_{mi} &= R_m + R_s + 2(R_i + R_{gi}) \end{aligned} \quad (6)$$

또한 식 (4)의 값은 수에 대한 행렬식은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (4)를 이용하여 자속 행렬식은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$[\Phi] = [R]^{-1}(n[M][I] + [F_m]) \quad (8)$$

공극자속밀도는 일반적으로 누설과 프링징의 영향으로 감소한다. 하지만 자기 베어링에서 누설과 프링징에 의한 자속밀도의 감소는 간단한 보정 계수를 이용하여 해결할 수 있다. 따라서 공극 자속 밀도는 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$B_i = k \frac{\Phi_i - \Phi_{i-1}}{A_g} \quad (9)$$

공극자속밀도를 이용한 힘 특성식으로부터 식(10)을 얻을 수 있다.

$$F_i = \frac{1}{2} k^2 \frac{(\Phi_i - \Phi_{i-1})^2}{A_g^2} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 회전자의 반경방향 자기력을 복소벡터를 이용하여 표현하면 식 (11)과 같다.

$$F_\phi = \sum_{j=1}^n (j)^{i+1} (F_{i+2} - F_i) \quad (11)$$

그림 4는 모델 4에서 제시한 방법으로 영구자석을 배치하고, 영구자석 체적당 힘밀도 향상시킨 새로운 모델에 대하여 자기등가회로 해석과 유한요소해석의 결과를 비교한 것이다. 그림에서 힘특성은 좌측에 도시하였고 자속밀도는 우측에 사용하였다. 여기서 FEA는 유한요소해석을 의미하며, MCA는 자기등가회로해석을 의미한다. 그림에서의 컨트롤 자속에 의한 힘특성은 바이어스 자속과 반대 방향으로 작용하고 있으며 그림에서는 크기만을 도시하였다.

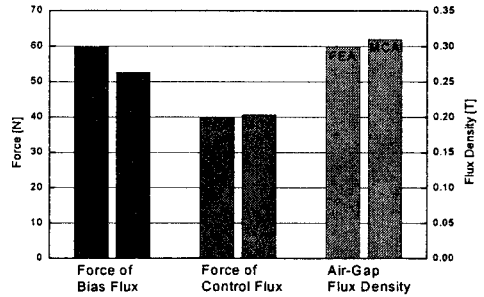


그림 4 호모폴라형 자기베어링의 특성 비교

### 3. 결 론

호모폴라형 자기베어링은 능동형과 수동형 자기베어링의 장점을 이용한 것으로 영구자석을 사용하여 전력 소비를 감소시킨 형태이다. 하지만 영구자석의 사용은 제작 비용을 증가시키는 결과를 초래하므로 요구되는 지지력을 얻기 위하여 영구자석의 사용량과 배치법을 최적화하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 호모폴라형 자기베어링의 영구자석 배치에 따른 전기적 특성을 비교하여, 우수한 특성을 갖는 영구자석 배치법을 제시하였다. 또한 영구자석이 최적적으로 배치된 모델에 대하여 힘특성식을 유도하였고, 이것을 유한요소해석 결과와 비교하여 검증하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 이동주, 홍준희, 박종권공역, "자기베어링의 기초와 응용", 일본기계학회, 시그마프레스, 2001
- [2] 최상규, 이동환, 이안성, 경진호, 김종수의, "플라이휠 에너지 저장기술 개발에 관한 최종보고서", 통상산업부, 1997.12.
- [3] Perry Tsao, Seth R. Sanders, Gabriel Risk, "A Self-Sensing Homopolar Magnetic Bearing: Analysis and Experimental Results", Industry Applications Conference 34 IAS Annual Meeting, IEEE, Vol.4 pp.2560-2565, 1999
- [4] Uhn Joo Na and Alan B. Palazzolo, "Rault Tolerance of Magnetic Bearings with Material Path Reluctances and Fringing Factors", IEEE Tran. on Magnetics. VOL. 36, NO. 6, Novem ber 2000