

# 전자석 바이어스 반경방향-축방향 일체형 자기베어링 해석

## Analysis of an Electromagnetically Biased Combined Radial and Axial Magnetic Bearing

나 언 주\*

Uhn Joo Na

(2010년 8월 20일 접수 ; 2010년 11월 9일 심사완료)

**Key Words** : Active Magnetic Bearing(능동 전자기 베어링), Homopolar Magnetic Bearing(동극형 자기베어링)

### ABSTRACT

The theory for a new electromagnetically biased combined radial and axial magnetic bearing is developed. This combined magnetic bearing uses two axial coils to provide the bias flux to the radial and axial air gaps of the combined bearing. One dimensional magnetic circuit model for this combined magnetic bearing is developed and analyzed such that flux densities and magnetic forces can be obtained. Three dimensional finite element model for the bearing is also developed and analyzed. Numerical analysis shows that the calculated magnetic forces from 1D model are well matched with those from the finite element model.

### 기 호 설 명

- $a_0$  : 반경방향 극의 표면면적
- $a_{z0}$  : 축 방향 극의 표면 면적
- $D$  : 반경방향 공극의 에너지 행렬
- $D_z$  : 축 방향 공극 에너지 행렬
- $g_0$  : 반경방향 베어링의 기준 공극
- $g_{z0}$  : 축 방향 베어링의 기준 공극
- $i_j$  :  $j$ 번째 반경방향 극의 전류
- $i_{zj}$  :  $j$ 번째 축방향 극의 전류
- $i_{cx}, i_{cy}, i_{cz}$  :  $x, y, z$ 의 제어 전류
- $n$  : 반경방향 베어링의 코일 권선수
- $\hat{n}$  : 축 방향 베어링의 코일 권선수
- $T$  : 전류 분배 행렬
- $x, y, z$  : 회전자 변위
- $\mu_0$  : 공기 투자율

- $\zeta$  : 가장자리 자속인자
- $\phi_j$  :  $j$ 번째 반경방향 극의 자속
- $\phi_{zj}$  :  $j$ 번째 축 방향 극의 자속
- $\theta_j$  :  $j$ 번째 반경방향 극의 극각

### 1. 서 론

능동자기베어링 시스템은 전통적인 유막베어링이나 구름베어링에 비해 마찰에너지 감소, 무윤활, 능동 강성 및 감쇠 조정 등 많은 장점을 가져 가스터빈, 공작기계, 펌프, 에너지 저장장치 등의 고속, 고성능의 회전기계에 점점 적용을 확대하고 있다<sup>(1,2)</sup>.

전통적인 이극형 전자기 베어링에 대한 설계과정과 설계기법은 여러 연구자들에 의해 소개되었다<sup>(3-5)</sup>. 이극형(heteropolar) 자기베어링과는 달리 동극형(homopolar) 자기베어링은 영구자석 또는 전자석을 이용하여 편향 바이어스 자속을 유지하고 코일전류를 이용하여 제어자속을 형성하는 자기베어링의 형태로 여러 연구자들이 해석적 기법과 설계기법 및 실험결과를 보고하였다<sup>(6-9)</sup>. 일반적으로 로터-자기베

\* 교신저자; 정회원, 경남대학교 기계자동화공학부  
E-mail : uhnjoona@kyungnam.ac.kr  
Tel : (055)249-2162, Fax : (055)249-2617

어링 시스템은 2개의 반경방향 자기베어링과 1개의 축 방향 자기베어링으로 구성되지만 각각의 자기베어링이 차지하는 공간으로 인하여 로터의 길이가 길어지게 되고 위험속도 제한 등 회전체동역학적 성능을 제한한다. 이러한 공간적인 제약을 개선하기 위하여 반경방향 자기베어링과 축 방향 자기베어링을 결합한 일체형 자기베어링에 대한 연구가 진행되었다. 소형 경량화를 위한 일체형 설계의 한 방식은 영구자석의 자속 경로를 반경방향과 축 방향을 경유하게 설계하여 동극형 반경방향 자기베어링과 축 방향 자기베어링의 공극에 바이어스 자속을 공급하는 것으로<sup>(10)</sup> 이 방법은 영구자석으로 바이어스 자속을 공급함으로써 에너지 절감에 유리한 장점이 있으나 바이어스 자속이 고정되어 제어의 유연성이 약화되고 초기부상 시에 강한 음강성(negative stiffness)을 유발 할 수 있다. 한편 로렌즈 힘으로 축 방향 자기베어링을 제어하고 축 방향의 디스크를 없앤 반경방향-축 방향 일체형 자기베어링도 연구 되었다<sup>(11)</sup>.

이 논문에서는 전자석 코일로 편향 바이어스 자속을 공급하는 반경방향과 축방향 일체형 자기베어링 모델을 제시한다. 본문에서는 일체형 자기베어링의 구조, 원리, 해석방법이 설명되고, 1D 자기회로와 3D 유한요소 해석을 통하여 자기베어링을 설계하고 성능을 검증한다.

## 2. 자기베어링 모델

### 2.1 일체형 자기베어링 구조와 원리

전자기 바이어스 반경방향-축 방향 일체형 자기베어링은 Fig. 1에 소개된 것과 같이, C자형 코어를 이루고 있는 축 방향 고정자 코어, 동극형 반경방향 고정자 코어, 축 방향 고정자와 반경방향 고정자 사이에 위치한 회전자 코어로 구성된다.

축 방향 고정자 코어와 반경방향 고정자 코어의 사이에 위치한 2개의 축 방향 코일은 각각 독립적으로 제어되며 바이어스 전류와 축 방향 제어전류를 공급한다.

제어 원리는 한쪽 코일에서는 바이어스 전류와 축 방향 제어 전류가 합친 형태의 제어전류가 인가되고 다른 쪽 코일에서는 바이어스 전류에서 축 방향 제어 전류가 빠지는 형태로 제어전류가 인가되

면 Fig. 2에 도시된 것 같이, 반경방향 고정자-회전자-축 방향 고정자로 연결되는 자기 경로로 바이어스 자속이 공급되는 동시에 축 방향 고정자-회전자-축 방향 고정자로 연결되는 축방향 제어 자속이 공급된다.

일체형 자기베어링의 반경방향 자기베어링 고정자는 8개의 극으로 구성되며 동극형 자기베어링 형태로

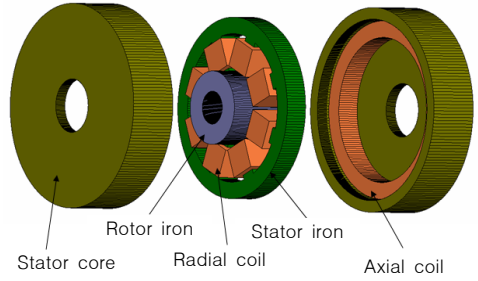


Fig. 1 Extended view of the bearing assembly

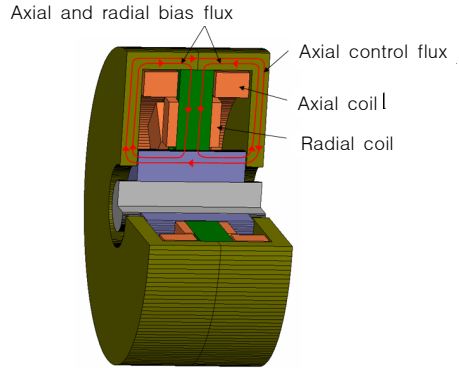


Fig. 2 Cutaway view of the bearing assembly

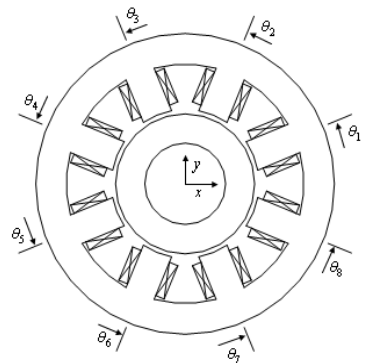


Fig. 3 Schematic of radial magnetic bearing

제어된다. 동극형 자기베어링의 코일 권선의 한 방식은 반경방향 고정자의 각각의 마주보는 극쌍(pole pair)에 4개의 코일을 직렬로 연결하여 각각의 전류 증폭기로 구동하는 방식으로 4개의 전류증폭기와 제어채널이 필요한 대신 고장강건에 유연하게 대처할 수 있다.

예를 들면 Fig. 3의 1번 극에 시계방향으로 감긴 코일은 5번 극에 반 시계 방향으로 감겨 전류가 인가되면 1번 극-회전자-5번 극으로 흐르는 C-코어 자속이 형성된다. 각극에 인가된 코일전류벡터  $I$ 는 코일 감김 법칙에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_1 \\ \tilde{i}_2 \\ \tilde{i}_3 \\ \tilde{i}_4 \end{bmatrix} = K\tilde{I} \quad (1)$$

반경방향 자기베어링에 분배되는 제어전류  $\tilde{I}$ 는 일반적으로 분배행렬  $T$ 와 제어 전류 벡터(control current vector)  $i_c$ 로 표시된다.

$$\tilde{I} = Ti_c \quad (2)$$

여기서,

$$T = \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{8} & \sin \frac{\pi}{8} \\ \cos \frac{3\pi}{8} & \sin \frac{3\pi}{8} \\ \cos \frac{5\pi}{8} & \sin \frac{5\pi}{8} \\ \cos \frac{7\pi}{8} & \sin \frac{7\pi}{8} \end{bmatrix}, i_c = \begin{bmatrix} i_{cx} \\ i_{cy} \end{bmatrix}$$

이다.

축 방향 전류벡터  $I_z$ 는 바이어스 전류  $I_b$ 와 축방향 제어전류  $I_{cz}$ 로 구성된다. 바이어스 전류  $I_b$ 는 반경방향과 축 방향 공극에 바이어스 자속을 공급하며 축방향 제어전류  $I_{cz}$ 는 축 방향 공극에 제어자속을 공급한다.

$$I_z = I_b + I_{cz} \quad (3)$$

여기서,

$$I_b = \begin{bmatrix} i_b \\ i_b \end{bmatrix}, I_{cz} = \begin{bmatrix} i_{cz} \\ -i_{cz} \end{bmatrix}$$

이다.

### 2.2 자기회로 해석

와전류 효과와 경로 자기저항을 무시하면 막스웰 방정식은 등가 자기회로로 단순화 된다. 일체형 자기베어링의 자기회로는 Fig. 4에 표시된다. 반경방향 자기베어링의  $j$ 번째 능동 극의 자기저항과 축 방향 자기베어링의 자기저항은 다음과 같이 정의된다.

$$R_j = \frac{g_j}{\mu_0 a_0} \quad (4)$$

$$R_{zj} = \frac{g_{zj}}{\mu_0 a_{z0}} \quad (5)$$

여기서,

$$g_j = g_0 - x \cos \theta_j - y \sin \theta_j$$

$$g_{z1} = g_{z0} - z, g_{z2} = g_{z0} + z$$

이다.

자기회로에 암페어 법칙과 가우스 법칙을 적용하면 반경방향 자속과 전류와의 관계는 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} R_1 & -R_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2 & -R_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & R_7 & -R_8 \\ 1 & 1 & \dots & \dots & 1 & 1 + \frac{R_8}{R_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \dots \\ \dots \\ \phi_7 \\ \phi_8 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} n & -n & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & n & -n & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & n & -n \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \frac{n}{R_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ \dots \\ i_7 \\ i_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 \\ \frac{\hat{n}}{R_{z1}} & \frac{\hat{n}}{R_{z2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{z1} \\ i_{z2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

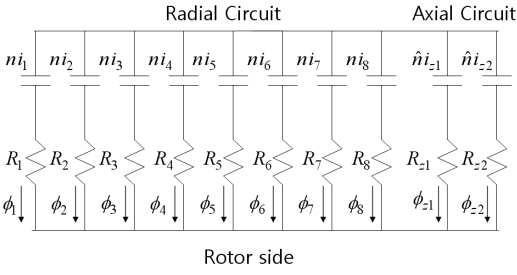


Fig. 4 Equivalent magnetic circuit

$$R_r = \frac{R_{z1}R_{z2}}{R_{z1} + R_{z2}}$$

또는,

$$R\Phi = NI + H_z I_z \quad (7)$$

이다.

자기회로 Fig. 4의 자기회로는 단순화 되어 Fig. 5와 같이 표현할 수 있다.

Fig. 5로 부터 자기회로의 축 방향 자속과 전류와의 관계는 다음과 같은 행렬식으로 유도된다.

$$\begin{bmatrix} R_{z1} & -R_{z1} \\ 1 + \frac{R_{z1}}{R_{eq}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{z1} \\ \phi_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{n} \\ \hat{n} \\ R_{eq} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{z1} \\ i_{z2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{n}{R_1} & \frac{n}{R_2} & \dots & \frac{n}{R_7} & \frac{n}{R_8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_7 \\ i_8 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8}}$$

$$H_{eq} = \frac{\frac{ni_1}{R_1} + \frac{ni_2}{R_2} + \frac{ni_3}{R_3} + \frac{ni_4}{R_4} + \frac{ni_5}{R_5} + \frac{ni_6}{R_6} + \frac{ni_7}{R_7} + \frac{ni_8}{R_8}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8}}$$

또는,

$$R_z \Phi_z = \hat{N} I_z + H I \quad (9)$$

이다.

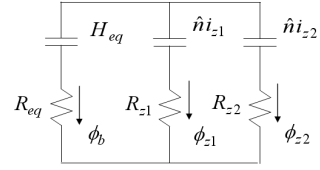


Fig. 5 Equivalent axial magnetic circuit

공극에 흐르는 자속밀도는 자기누설에 의해 감소되고 자성체의 포화에 의해 제한된다. 반경방향 자기베어링과 축 방향 자기베어링의 공극 자속밀도 벡터는 다음과 같다.

$$B = \zeta A^{-1} R^{-1} (NI + H_z I_z) \quad (10)$$

$$B_z = \zeta A_z^{-1} R_z^{-1} (\hat{N} I_z + H I) \quad (11)$$

여기서,

$$A = \text{diag}([a_0, a_0, a_0, a_0, a_0, a_0, a_0, a_0])$$

$$A_z = \text{diag}([a_{z0}, a_{z0}])$$

이다.

반경방향 자기베어링과 축 방향 자기베어링의 자기력은 다음과 같다.

$$F_x = B^T \frac{\partial D}{\partial x} B \quad (12)$$

$$F_y = B^T \frac{\partial D}{\partial y} B \quad (13)$$

$$F_z = B_z^T \frac{\partial D_z}{\partial z} B_z \quad (14)$$

여기서,

$$D = \text{diag}([g_j a_0 / (2\mu_0)])$$

$$D_z = \text{diag}([g_{zj} a_{z0} / (2\mu_0)])$$

이다.

자기력 식 (12), (13), (14)는 베어링의 평형점 위치와 평형점 제어전류의 작동점에서 테일러 급수 전개를 이용하여 선형화 된다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} k_{pxx} & k_{pxy} & k_{pxz} \\ k_{pyx} & k_{pyy} & k_{pyz} \\ k_{pzx} & k_{pzy} & k_{pzz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{ixx} & k_{ixy} & k_{ixz} \\ k_{iyx} & k_{iyy} & k_{iyz} \\ k_{izx} & k_{izy} & k_{izz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cx} \\ i_{cy} \\ i_{cz} \end{bmatrix} \quad (15)$$

또는,

$$F = -K_p X + K_l I_c \quad (16)$$

식 (15)의 일체형 자기베어링의 위치강성,  $k_{p\alpha\beta}$ , 전류강성,  $k_{i\alpha\beta}$  은 다음과 같이 계산된다.

$$k_{p\alpha\beta} = \frac{\partial F_\alpha}{\partial \beta} \begin{matrix} \alpha=\alpha_0 \\ \beta=\beta_0 \\ \gamma=\gamma_0 \\ i_{c\alpha}=i_{c\alpha 0} \\ i_{c\beta}=i_{c\beta 0} \\ i_{c\gamma}=i_{c\gamma 0} \end{matrix}, \quad k_{i\alpha\beta} = \frac{\partial F_\alpha}{\partial i_{c\beta}} \begin{matrix} \alpha=\alpha_0 \\ \beta=\beta_0 \\ \gamma=\gamma_0 \\ i_{c\alpha}=i_{c\alpha 0} \\ i_{c\beta}=i_{c\beta 0} \\ i_{c\gamma}=i_{c\gamma 0} \end{matrix} \quad (17)$$

변수  $\alpha, \beta, \gamma$  는 각각  $x, y, z$  를 나타낸다.

### 3. 수치해석

제시된 일체형 자기베어링의 하중능력, 강성계수 등의 설계 파라미터는 먼저 1D 자기회로 모델의 해석을 통하여 계산되고 3D 유한요소 수치해석을 통하여 자기누설 및 자기포화 등을 고려한 성능이 검증된다.

반경방향 공극  $g_0(0.5 \text{ mm})$ , 축 방향 공극  $g_{20}(0.5 \text{ mm})$ , 반경방향 극 표면면적  $a_0(140 \text{ mm}^2)$ , 축 방향 극 표면면적  $a_{20}(725.7 \text{ mm}^2)$ , 반경방향 코일 감김수  $n(70 \text{ turns})$ , 축 방향 코일 감김수  $\hat{n}(200 \text{ turns})$  으로 설계된 반경방향-축 방향 일체형 자기베어링은 상용 유한요소 프로그램(MAXWELL3D)으로 모델링 되었다. 고정자 및 회전자 코어 재료의 전자기 특성 B-H curve는 Fig. 6에 나타나 있다. 가장자리 자속 인자  $\varsigma$  를 0.92로 가정하고 바이어스 전류  $i_b=2.5A$  를 1D 자기회로 식 (10), (11)에 대입하면 반경방향 및 축 방향의 바이어스 공극 자속밀도, 0.66 tesla, 0.52 tesla가 얻어지고 Fig.7에 도시된 것 같이, 유한요소 모델 해석을 통하여 계산된 반경방향 및 축방향의 바이어스 공극 자속밀도, 0.68 tesla, 0.53 tesla 와 거의 일치함을 알 수 있다.

일체형 자기베어링의 하중능력을 검증하기 위하여 1D 자기회로 모델과 3D 유한요소 수치해석이 수행되었다. 바이어스 전류  $i_b = 2.5A$ , 제어전류  $i_{cx} = 4.0\cos(\omega t)$ ,  $i_{cy} = 4.0\sin(\omega t)$ ,  $i_{cz} = 1.25\cos(\omega t)$ ,  $t = [0 \ 2\pi/\omega]$ 를 식 (2), (3)에 대입하면 식 (10), (11)에 의해서 Fig. 8과 같이 공극 자속밀도가 계산된다.

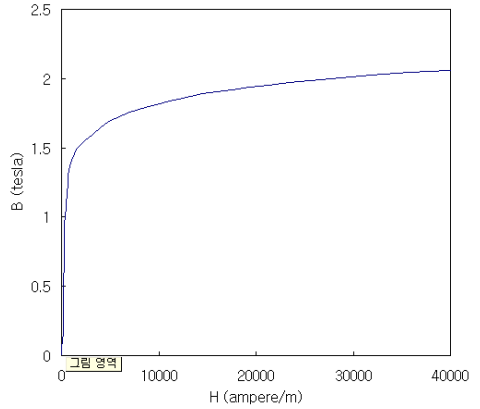


Fig. 6 B-H curve of the core material

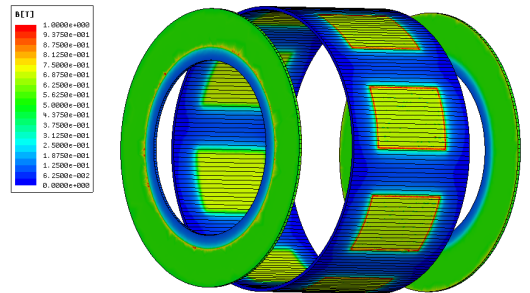


Fig. 7 Bias flux densities at air gaps

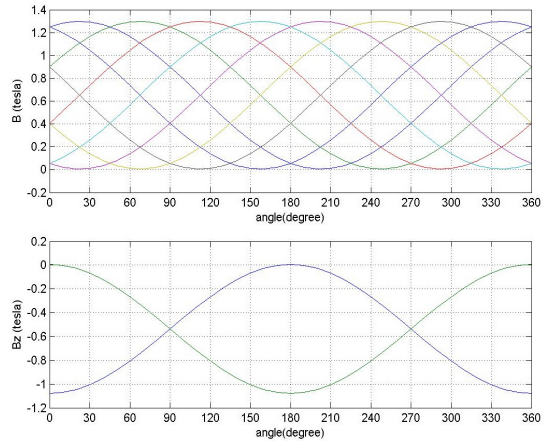


Fig. 8 AC magnetic flux densities(1D model)

일체형 자기베어링의 AC 자기력은 식 (12)~(14)에 의해 계산되고 또한 유한요소 모델 해석을 통해 주어진 12개의 제어전류 벡터에 대하여 검증되었다. 계산된 AC 자기력은 Fig. 9에 나타나 있다. 일체형 자기베어링은 반경방향의 자기경로와 축방향의 자기

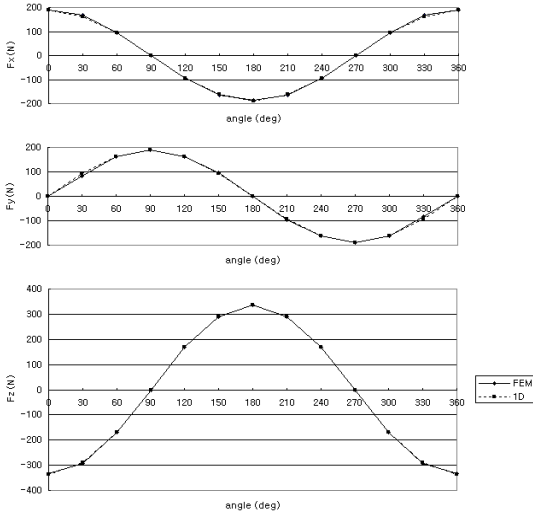


Fig. 9 Calculated AC magnetic forces

경로가 근접해 있고 공유하고 있어 서로간의 자기 누설과 자기포화의 영향을 무시할 수 없다. 따라서 보다 정확한 예측을 위해서는 3D 모델 해석이 필요하다.

일체형 자기베어링의 선형화된 자기력은 1D 자기회로 식 (15)에 의해 계산된다. 바이어스 전류  $i_b=2.5A$ 와 평형점  $x=y=z=0$ ,  $i_{cx}=i_{cy}=i_{cz}=0$ 에서 계산된 위치강성 및 전류강성은 다음과 같다.

$$K_p = \begin{bmatrix} -379781 & 0 & 0 \\ 0 & -379781 & 0 \\ 0 & 0 & -663676 \end{bmatrix} \text{ N/m} \quad (19)$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 39.92 & 0 & 0 \\ 0 & 39.92 & 0 \\ 0 & 0 & 258.28 \end{bmatrix} \text{ N/A} \quad (20)$$

일체형 자기베어링은 반경방향과 축 방향의 자기 경로가 연결되어 있기 때문에 반경방향과 축 방향 간의 연성효과(coupling)를 점검하는 것이 필요하다. 연성효과를 알아보기 위해 바이어스 전류  $i_b=2.5A$ 와 평형점  $x=0$ ,  $y=-0.1 \text{ mm}$ ,  $z=0.1 \text{ mm}$ ,  $i_{cx}=0$ ,  $i_{cy}=0.5A$ ,  $i_{cz}=1.0A$ 에서의 위치강성 및 전류강성을 식 (15)에 의해 계산한 결과는 다음과 같다.

$$K_p = \begin{bmatrix} -384727 & 0 & 0 \\ 0 & -420377 & 60860 \\ 0 & -8167 & -794323 \end{bmatrix} \text{ N/m} \quad (21)$$

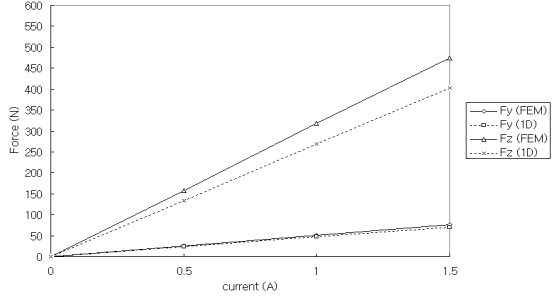


Fig. 10 Current forces

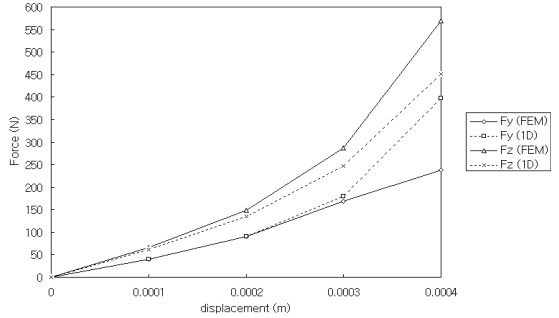
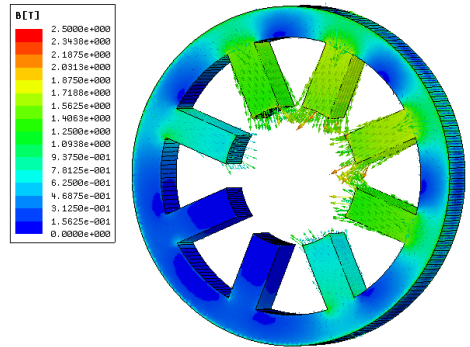
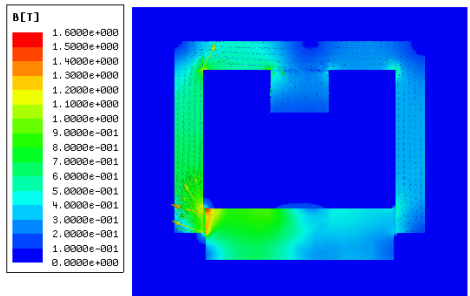


Fig. 11 Position forces



(a) Flux at the radial stator



(b) Flux at the axial stator core

Fig. 12 Flux densities at the bearing

$$K_i = \begin{bmatrix} 39.86 & 0 & 0 \\ 0 & 40.943 & 3.9 \\ 0 & -3.3 & 292.2 \end{bmatrix} \text{ N/A} \quad (22)$$

식 (21), (22)를 보면 비교적 크게 편심된 회전자  
의 평형점과 DC 제어전류의 영향하에서도 연성효  
과가 크지 않은 것을 알 수 있다. 일체형 자기베어링  
의 위치강성과 전류강성은 또한 유한요소 모델  
해석을 통해 검증되었다. 위치에 따른 자기력 변화  
를 계산하기 위해 제어전류는 0으로 주고 회전자는  
각각 반경방향과 축 방향으로 편심된 위치에서 자  
기력이 계산되었고 전류의 변화에 따른 자기력을  
구하기 위해 회전자를 베어링 중심에 위치시키고  
제어전류를 변화시키며 자기력을 구하였다. 위치에  
따른 자기력과 전류에 따른 자기력은 식 (12)~(14)  
에 의해서 구할 수 있고 1D 자기력과 3D 자기력은  
Fig. 10과 Fig. 11에 비교되어 나타나 있다. 계산된  
반경방향 및 축 방향 자기베어링의 위치강성은 각  
각 약 -405700 N/m과 -655800 N/m으로 계산되었고  
전류강성은 51.7 N/A와 317.7 N/A으로 1D 모델과  
약간의 차이를 보였다. 3D모델의 위치강성은 제로  
점과 근거리(0.05 mm)에서의 자기력 차이를 미분하  
였고 전류강성도 제로점과 0.5A에서의 자기력 차이  
를 미분하였다. Fig. 11에서와 같이 반경방향 위치  
자기력은 약 0.3 mm의 편심에서 자기포화가 시작되  
는 것을 알 수 있다.

마지막으로 반경방향과 축방향 코일에 DC 제어전  
류를 인가하고 자기력을 계산하였다. 바이어스전류  
 $i_b = 2.5A$ , 제어전류  $i_{cx} = 2.85A$ ,  $i_{cy} = 2.85A$ ,  $i_{cz} = 0.5A$   
를 인가하고 유한요소 모델링을 통하여 계산한 자기  
력은  $F_x = 134.6 N$ ,  $F_y = 134.6 N$ ,  $F_z = 153.8 N$ 이 얻어  
졌고 1D 자기회로를 통하여 얻어진 자기력과 거의  
일치하였다. DC 제어전류가 인가된 일체형 자기베어  
링의 자속 분포는 Fig. 12에 나타나 있다.

### 5. 결 론

기존에 제시된 영구자석 바이어스 일체형 자기베  
어링<sup>(10)</sup>은 에너지 절감에 유리한 장점이 있으나 영  
구자석 사용으로 인해 구조가 복잡해지고 바이어스  
자속이 고정되어 제어의 유연성이 약화되며 초기부  
상 시에 강한 음강성(negative stiffness)을 유발 할

수 있고 고온환경에서 영구자석의 자성에 영향을  
받아 적용에 제한을 받는다. 이 논문에서 제안된 전  
자석 바이어스 반경방향-축 방향 일체형 자기베어링  
모델은 2개의 전자석 코일을 이용하여 동극형 반경  
방향 자기베어링과 축 방향 자기베어링에 바이어스  
자속을 공급하는 방식으로 일정량의 바이어스 전력  
소모가 요구되지만 간단하고 강인한 구조로 제작에  
유리하며 바이어스 자속의 조절을 통하여 제어의  
유연성을 확보할 수 있다. 이 논문에서는 먼저 일체  
형 자기베어링의 1D 자기회로 해석을 통하여 자기  
베어링의 공극 자속밀도, 자기력, 선형 자기력 등의  
해석모델을 제시하였다. 또한 일체형 자기베어링의  
유한요소 모델의 수치해석을 통하여 1D 모델로 계  
산된 공극 자속밀도, 자기력, 선형 자기력 등을 비  
교 검증하였다. 향후 연구계획은 본 논문에서 제시  
된 일체형 베어링의 시험기를 제작하고 제어시스템  
의 성능실험을 할 예정이다.

### 후 기

이 연구는 경남대학교 연구사업의 지원에 의하  
는 것이며 관계자 분들께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Chang, I.-B. and Han, D.-C., 1995, "Per-  
formance Study of Magnetic Bearing considering the  
Performance Limit," Transactions of the Korean  
Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 5,  
No. 1, pp. 59-65.
- (2) Kim, S. J. and Okada, Y., 2002, "4-pole  
Lorentz Force Type Self-bearing Motor with a New  
Winding Configuration," Transactions of the Korean  
Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.  
12, No. 1, pp. 73-81.
- (3) Zmood, R. B., Qin, L. J., Kirk, J. A. and Sun,  
L., 1997, "A Magnetic Bearing System Design  
Methodology and Its Application to a 50 Wh Open  
Core Composite Flywheel," Proc. of the 32nd  
IECEC, Vol. 4, pp. 2306-2311.
- (4) Park, Y. J. and Chung, S. C., 1998, "A Study  
on the Optimal Design of Radial Magnetic

Bearings,” Transactions of the KSME A, Vol. 22, No. 7, pp. 1166~1176.

(5) Schweitzer, G. and Maslen, E. H., 2009, Magnetic Bearings, Theory, Design, and Application to Rotating Machinery, Springer.

(6) Sortore, C. K., Allaire, P. E., Maslen, E. H., Humphris, R. R. and Studer, P. A., 1990, “Permanent Magnet Biased Magnetic Bearings-Design, Construction and Testing,” Proceedings of the Second International Symposium on Magnetic Bearings, pp. 175~182.

(7) Maslen, E. H., Allaire, P. E., Noh, M. D. and Sortore, C. K., 1996, “Magnetic Bearing Design for Reduced Power Consumption,” ASME Journal of Tribology, Vol. 118, pp. 839~846.

(8) Lee, A. C., Hsiao, F. Z. and Ko, D., 1994,

“Analysis and Testing of a Magnetic Bearing with Permanent Magnets for Bias,” JSME International Journal, Series C, Vol. 37, pp. 774~782.

(9) Fukata, S., Yutani, K. and Kouya, Y., 1998, “Characteristics of Magnetic Bearings biased with Permanent Magnets in the Stator,” JSME International Journal, Series C, Vol. 41, pp. 206~213.

(10) McMullen, P. T., Huynh, C. S. and Hayes, R. J., 2000, “Combination Radial-axial Magnetic Bearing,” Proceedings of the Seventh International Symposium on Magnetic Bearings, pp. 473~478.

(11) Kim, H. Y. and Lee, C. W., 2006, “Design and Control of Active Magnetic Bearing System with Lorentz Force-Type Axial Actuator,” Mechatronics, Vol. 16, pp. 13~20.