

전자석 바이어스 Diskless반경방향-축방향 일체형 자기 베어링 해석 Analysis of an Electromagnet Biased Diskless Integrated Radial and Axial Magnetic Bearing

나 언 주*
Uhn Joo Na

(Received July 12, 2012 ; Accepted September 19, 2012)

Key Words : Active Magnetic Bearing(능동 전자기 베어링), Homopolar Magnetic Bearing(동극형 자기베어링), Reluctance Force(릴럭턴스 힘)

ABSTRACT

The theory for a new electromagnetically biased diskless combined radial and axial magnetic bearing is developed. A typical magnetic bearing system is composed of two radial magnetic bearings and an axial magnetic bearing. The axial magnetic bearing with a large axial disk usually limits rotor dynamic performance and makes assembling and disassembling difficult for maintenance work. This paper proposes a novel electromagnet biased integrated radial-axial magnetic bearing without axial disk. This integrated magnetic bearing uses two axial coils to provide the bias flux to the radial and axial air gaps of the combined bearing. The axial magnetic bearing unit in this combined magnetic bearing utilizes reluctance forces developed in the non-uniform air gaps such that the axial disk can be removed from the bearing unit. The 4-pole homopolar type radial magnetic bearing unit is also designed and analyzed. Three dimensional finite element model for the bearing is also developed and analyzed to illustrate the diskless combined magnetic bearing.

기 호 설 명

a_0 : 반경방향 극의 표면면적
 a_{z0} : 로터 단면적
 g_0 : 반경방향 베어링의 기준 공극
 i_j : j 번째 반경방향 극의 전류
 i_{zj} : j 번째 축방향 극의 전류
 i_{ex}, i_{cy}, i_{cz} : x, y, z 의 제어 전류
 n : 반경방향 베어링의 코일 권선수
 \hat{n} : 축 방향 베어링의 코일 권선수

x, y, z : 회전자 변위
 μ_0 : 공기 투자율
 ϕ_j : j 번째 반경방향 극의 자속
 θ_j : j 번째 반경방향 극의 극각

1. 서 론

능동자기베어링 시스템은 전통적인 유막베어링이나 구름베어링에 비해 많은 장점을 가져 고속, 고성능의 회전기계에 점점 적용을 확대하고 있다^(1,2).

동극형(homopolar) 자기베어링은 영구자석 또는

* Corresponding Author ; Member, Kyungnam University,
Dept of Mechanical Engineering
E-mail : uhnjoona@kyungnam.ac.kr
Tel : +82-55-249-2162, Fax : +82-55-249-2617

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

전자석을 이용하여 편향 바이어스 자속을 유지하고 코일전류를 이용하여 제어자속을 형성하는 자기베어링의 형태로 여러 연구자들이 해석적 기법과 설계기법 및 실험결과를 보고하였다⁽³⁻⁵⁾.

일반적으로 로터-자기베어링 시스템은 Fig. 1(a)에 제시된 것과 같이 2개의 반경방향 자기베어링과 1개의 축 방향 자기베어링으로 구성되지만 각각의 자기베어링이 차지하는 공간으로 인하여 로터의 길이 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 Fig. 1(b)에 제시된 것과 같이 영구자석의 자속 경로를 반경방향과 축 방향을 경유하게 설계하여 동극형 반경방향 자기베어링과 축 방향 자기베어링의 공극에 바이어스 자속을 공급하는 것으로⁽⁶⁾ 이 방법은 영구자석으로 바이어스 자속을 공급함으로써 에너지 절감에 유리한 장점이 있으나 바이어스 자속이 고정되어 제어의 유연성이 약화되고 초기부상 시에 강한 음강성을 유발 할 수 있다. 또한 이러한 형태의 일체형 자기베어링은 축 방향 디스크를 가진 구조로 분해 조립에 어려움이 따른다.

한편, 로렌츠 힘으로 축 방향 자기베어링을 제어하고 축 방향의 디스크를 없앤 반경방향-축 방향 일체형 자기베어링이 제시 되었다⁽⁷⁾. 또한 불균일한 (non-uniform) 공극에서 발생하는 릴럭턴스 복원 힘 (reluctance centering force)을 이용한 디스크 없는 축 방향 자기베어링도 연구되었다^(8,9).

일체형 자기베어링으로는 영구자석으로 바이어스 자속을 형성하고 릴럭턴스 복원 힘을 이용한 디스크 없는 반경방향-축 방향 일체형 자기베어링이 제시 되었다⁽¹⁰⁾. 이 반경방향-축 방향 일체형 자기베어링은 Fig. 1(c)에 제시된 것과 같이 반경방향 자기베어링은 맥스웰 힘을 이용하고 축 방향 자기베어링은 릴럭턴스 힘을 이용하여 축 방향 디스크를 없앤 구조이다.

이 논문에서는 기존에 제시된 영구자석 바이어스 일체형 자기베어링⁽¹⁰⁾과 달리, 전자석 코일로 편향 바이어스 자속을 공급하는 릴럭턴스 힘을 이용한 디스크 없는 반경방향-축방향 일체형 자기베어링 모델

을 제시한다. 본문에서는 일체형 자기베어링의 구조, 원리, 해석방법이 설명되고, 1D 자기회로 해석과 3D 유한요소 해석을 통하여 자기베어링을 설계하고 성능을 검증한다.

2. 자기베어링 모델

전자석 바이어스 디스크 없는 반경방향-축방향 일체형 자기베어링은 Fig. 2와 같이, C자형 코어를 이루고 있는 축 방향 고정자 코어, 동극형 반경방향 고정자 코어, 축 방향 고정자와 반경방향 고정자 사이에 위치한 회전자 코어로 구성된다.

기존의 영구자석 바이어스 반경방향-축방향 자기베어링은 Fig. 1(c)와 같이 축 방향 고정자 코어와 반경방향 고정자 코어의 사이에 영구자석을 위치시켜

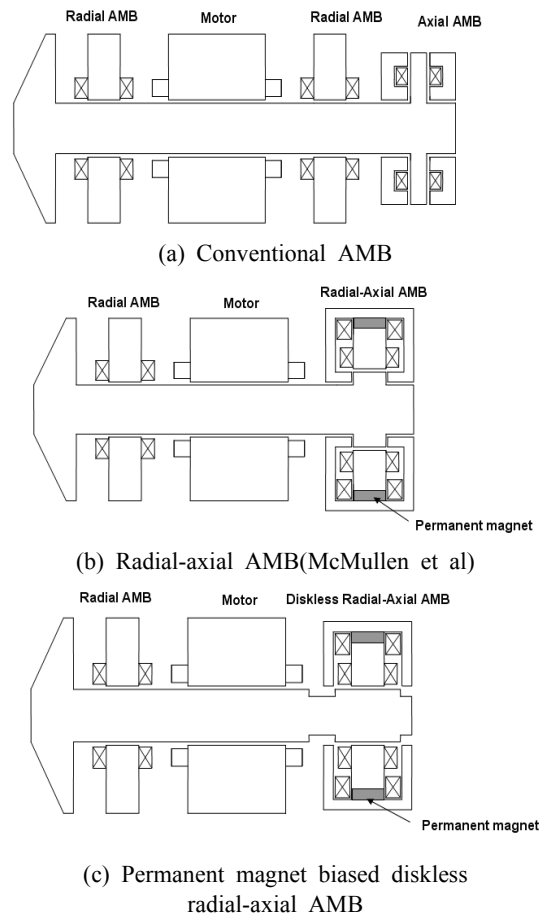


Fig. 1 Magnetic bearing systems

바이어스 자속을 반경방향 공극과 축 방향의 불균일 공극에 공급하고 축방향 코일을 이용하여 축 방향 제어자속을 공급한다. 하지만 전자석 바이어스 반경방향-축방향 일체형 자기베어링은 Fig. 3(a)와 같이 2개의 축 방향 코일을 각각 독립적으로 제어하여 바이어스 자속과 축 방향 제어자속을 공급한다. 즉 한쪽 축 방향 코일에서는 바이어스 전류와 축 방향 제어 전류가 합친 형태의 제어전류가 인가되고 다른 쪽 코일에서는 바이어스 전류에서 축 방향 제어 전류가 빠지는 형태로 제어전류가 인가되면 반경방향 고정자-회전자-축 방향 고정자로 연결되는 자기 경로로 바이어스 자속이 공급되는 동시에 축 방향 고정자-회전자-축 방향 고정자로 연결되는 축 방향 제어 자속이 공급된다.

축 방향 전류 i_{z1} , i_{z2} 는 바이어스 전류 i_b 와 축 방향 제어전류 i_{cz} 로 구성된다. 축 방향 코일에 인가되는 전류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_{z1} &= i_b + i_{cz} \\ i_{z2} &= -i_b + i_{cz} \end{aligned} \tag{1}$$

일체형 자기베어링의 반경방향 자기베어링 고정자는 Fig. 3(b)에 도시된 것 같이 4개의 극으로 구성되며 동극형 자기베어링 형태로 제어된다. 동극형 자기베어링의 코일 권선의 한 방식은 반경방향 고정자의 각각의 마주보는 극쌍(pole pair)에 코일을 직렬로 연결하여 각각의 전류종류기로 구동하는 방식이다.

예를 들면 Fig. 3(b)의 1번 극에 시계방향으로 감긴 코일은 3번 극에 반 시계 방향으로 감겨 전류가 인가되면 1번 극-회전자-3번 극으로 흐르는 C-코어 자속이 형성된다. 반경방향 자기베어링의 각각의 극에 공급되는 전류는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cx} \\ i_{cy} \end{bmatrix} \tag{2}$$

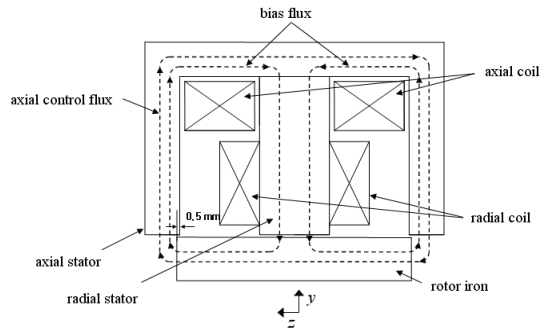
와전류 효과와 경로 자기저항을 무시하면 맥스웰 방정식은 등가 자기회로로 단순화 된다. 일체형 자기베어링의 자기회로는 Fig. 4에 표시된다.

반경방향 및 축방향의 공극에서의 릴럭턴스는 퍼미언스 모델을 통해 계산된다. 일체형 자기베어링의 퍼미언스 모델은 Fig. 5에 보여진다.

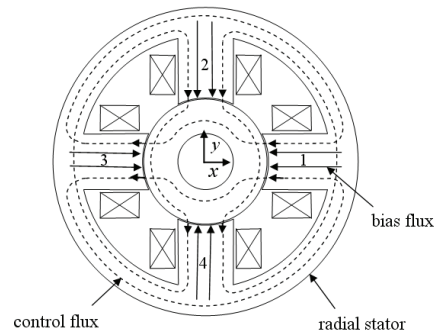
반경방향 자기베어링의 균일 공극(uniform air gap)의 릴럭턴스는 퍼미언스 P_1 , P_2 에 의해 계산된다. 누설 퍼미언스 P_2 를 무시하면 미소변위 x , y 에 대한 j 번째 극의 공극의 퍼미언스는 다음과 같다.

$$P_j = \frac{\mu_0 a_0}{g_j} \tag{3}$$

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



(a) Axial magnetic bearing unit



(b) radial magnetic bearing unit

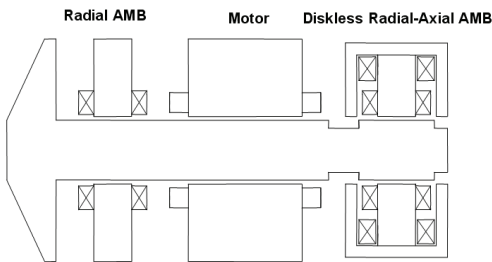


Fig. 2 Electromagnet biased diskless radial-axial AMB

Fig. 3 New integrated radial-axial magnetic bearing

반경방향 자기베어링의 j 번째 극의 공극의 릴럭턴스는 다음과 같다.

$$R_j = \frac{1}{P_j} = \frac{g_j}{\mu_0 a_0} \tag{4}$$

반경방향 공극의 릴럭턴스는 공극의 변화에 따라 선형적으로 변한다. 축방향 자기베어링의 공극은 반경방향 자기베어링과는 달리 비균질 공극(non-uniform air gap)으로 이루어진다. 비균질 공극에서의 릴럭턴스는 퍼미언스 P_3, P_4, P_5, P_6, P_7 에 의해 계산된다⁽¹¹⁾. 베어링 중심에서의 축방향 공극의 퍼미언스는 다음과 같이 계산된다.

$$P_z = P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 \tag{5}$$

여기서,

$$P_3 = \frac{2\pi\mu_0(r_1 + g_0/2)l}{g_0}$$

$$P_4 = 3.3\mu_0(r_1 + g_0/2)$$

$$P_5 = P_4$$

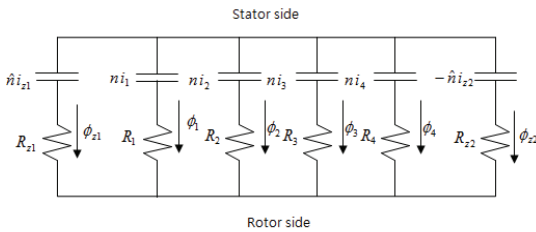


Fig. 4 Equivalent magnetic circuit

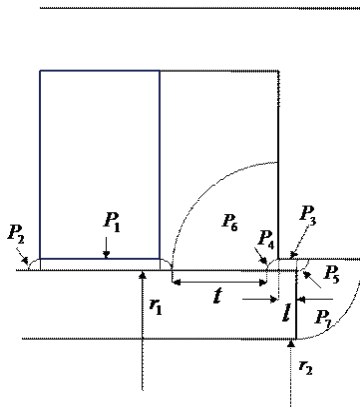


Fig. 5 Bearing permeance model

$$P_6 = 4\mu_0(r_1 + \sqrt{g_0(t + g_0)}) \ln \frac{t + g_0}{g_0}$$

$$P_7 = 4\mu_0(r_1 - r_2 + g_0 - \sqrt{g_0(r_1 - r_2 + g_0)}) \ln \frac{r_1 - r_2 + g_0}{g_0}$$

축방향 자기베어링의 균질공극 퍼미언스 P_3 는 전체 퍼미언스 P_z 의 약 18%에 해당되며 로터의 진동이나 형상오차의 영향으로 인한 런아웃이 발생해 P_3 의 30%가 변한다고 가정하면 최대 진동변위에 대한 퍼미언스 P_z 변화량은 약 5% 정도 이므로 전체 축방향 공극의 퍼미언스에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 따라서 축방향 자기베어링의 공극의 릴럭턴스는 다음과 같이 표현된다.

$$R_z = R_{z1} \approx R_{z2} = \frac{1}{P_z} \tag{6}$$

Fig. 4의 자기회로에 암페어 법칙과 가우스 법칙을 적용하면 반경방향 자속과 전류와의 관계는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} R_1 & -R_2 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & -R_3 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & -R_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 + \frac{2R_4}{R_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & -n & 0 & 0 \\ 0 & n & -n & 0 \\ 0 & 0 & n & -n \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2n}{R_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\hat{n}}{R_z} & -\frac{\hat{n}}{R_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{z1} \\ i_{z2} \end{bmatrix} \tag{7}$$

또는,

$$R\Phi = NI + H_z I_z \tag{8}$$

일체형 자기베어링의 자기회로의 축 방향 자속과 전류와의 관계는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} R_{z1} & -R_{z1} \\ 1 + \frac{R_{z1}}{R_{eq}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{z1} \\ \phi_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{n}}{R_{eq}} & \hat{n} \\ -\frac{\hat{n}}{R_{eq}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{z1} \\ i_{z2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{n}{R_1} & \frac{n}{R_2} & \frac{n}{R_3} & \frac{n}{R_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} \tag{9}$$

여기서

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$$

또는

$$R_z \Phi_z = \hat{N}I_z + HI \tag{10}$$

반경방향 자기베어링의 공극 자속밀도 벡터는 다음과 같다.

$$B = A^{-1}R^{-1}(NI + H_z I_z) \tag{11}$$

여기서,

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

축 방향 자기베어링의 로터 단면에서의 자속밀도 벡터는 다음과 같다.

$$B_z = A_z^{-1}R_z^{-1}(\hat{N}I_z + HI) \tag{12}$$

여기서,

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

3. 수치해석

제시된 일체형 자기베어링의 자속밀도 흐름은 먼저 1D 선형 자기회로 모델을 통하여 시뮬레이션 되었다. 일체형 자기베어링의 파라미터는 반경방향 공극 $g_0(0.5 \text{ mm})$, 반경방향 극 표면면적 $a_0(280 \text{ mm}^2)$, 로터 단면적 $a_{z0}(1300 \text{ mm}^2)$ 반경방향 코일 감김수 $n(70 \text{ turns})$, 축 방향 코일 감김수 $\hat{n}(200\text{turns})$ 으로 주어진다. Fig. 5의 자기베어링 형상계수는 $t(16 \text{ mm})$, $l(0.5 \text{ mm})$, $r_1(22.5 \text{ mm})$, $r_2(10 \text{ mm})$ 로 주어진다. 일체형 자기베어링에 전류를 인가하면 식 (11)~(12)에 의해서 Fig. 6과 같이 자속밀도가 계산된다. Fig. 6의 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- case1: $i_b = 3.5, i_{cx} = 3.0 \cos(\omega t), i_{cy} = 3.0 \sin(\omega t), i_{cz} = 0$
- case2: $i_b = 3.5, i_{cx} = 0, i_{cy} = 0, i_{cz} = 2.5 \sin(\omega t)$
- case3: $i_b = 3.5, i_{cx} = 3.0 \cos(\omega t), i_{cy} = 3.0 \sin(\omega t), i_{cz} = 2.5 \sin(\omega t)$

즉, case 1은 반경방향 자기베어링 제어전류와 바이어스 전류만 주어진 것이고 case 2는 축방향 자기베어링 제어전류와 바이어스 전류만 주어진 것이고 case 3은 반경방향 자기베어링 제어전류와 축방향 제어전류와 바이어스 전류가 동시에 주어진 것이다.

Fig. 6의 case 3은 반경방향 제어전류와 축방향 제어전류가 동시에 인가되었을 때에도 반경방향 자속과 축방향 자속이 독립적으로 C 코어 자속을 형성하여 자기연성이 발생하지 않음을 보여준다.

제시된 일체형 자기베어링의 자속 및 자기력은 또한 3D 유한요소 수치해석(MAXWELL3D)을 통하여 시뮬레이션 되었다. 전자석 바이어스 디스크 없는 일체형 자기베어링의 MAXWELL3D 모델은 Fig. 7에 보여진다. 또한 고정자 및 고정자 및 회전자 코어 재질의 전자기 특성 B-H curve는 Fig. 8에 제시 되었다.

축 방향 코일에 바이어스 전류 $i_b=3.5 \text{ A}$ 와 $i_{cz}=0 \text{ A}$ 즉 $i_{z1}=3.5 \text{ A}$ 와 $i_{z2}=-3.5 \text{ A}$ 를 인가하고 MAXWELL3D 유한요소 해석을 수행하면 Fig. 9와 같이 반경방향 바이어스 공극 자속밀도로 약 0.61 tesla가 계산된다. 또한 Fig. 10과 같이 축 방향 고정자-회전자-반경방향 고정자로 이어지는 C코어 바이어스 자속이 형성 된다.

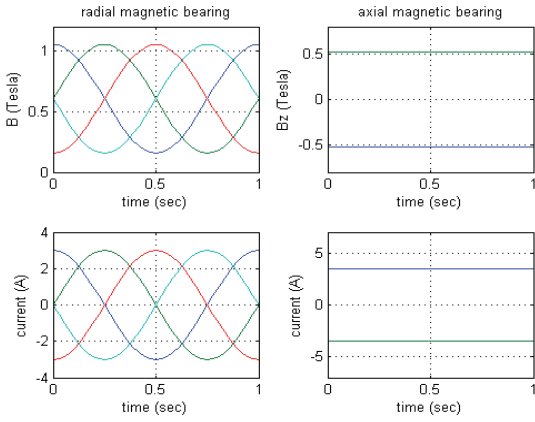
축 방향 제어전류 i_{cz} 를 증가시키면 양측의 축 방향 고정자와 회전자사이의 불균형 공극(non-uniformair gap)에 자속의 불균형이 발생하고 그에 따른 릴럭턴스 힘의 불균형을 발생시킨다. 일체형 자기베어링의 축 방향의 최대 자기력을 구하기 위하여 축 방향 코일에 바이어스 전류 $i_b=3.5 \text{ A}$ 와 $i_{cz}=3.5 \text{ A}$ 즉 $i_{z1}=7 \text{ A}$ 와 $i_{z2}=0 \text{ A}$ 를 인가하면 Fig. 11과 같이 왼쪽의 축 방향 고정자와 회전자 사이의 불균일 공극에서의 자속은 최대가 되고 오른쪽 공극에서는 최소가 됨을 알 수 있다. 이때 축 방향으로 약 186 N의 릴럭턴스 힘이 계산되었다.

또한 일체형 자기베어링의 반경방향의 최대 자기력을 구하기 위하여 반경방향 및 축 방향 코일에 $i_{cx}=4 \text{ A}$, $i_{cy}=0 \text{ A}$, $i_{z1}=3.5 \text{ A}$, $i_{z2}=-3.5 \text{ A}$ 를 인가하면 Fig. 12와 같이 반경방향 1번 극에 최대 자속, 3번극에 최소 자속이 흐르고 2번과 4번 극에는 바이어스 자속이 흐르게 된다. 이때 x축 방향으로 약 168 N의 맥스웰 힘이 계산되었다.

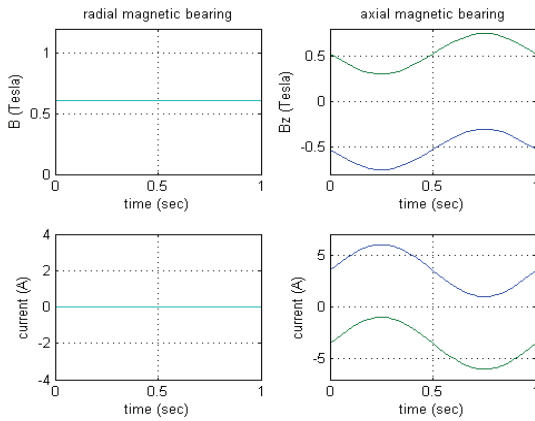
제안된 디스크 없는 일체형 자기베어링의 자기력

선형성을 알아보기 위하여 제어 전류와 편심 변위에 따른 자기력의 변화를 계산하였다. 먼저 전류의 변화에 따른 자기력을 구하기 위해 회전자를 베어링

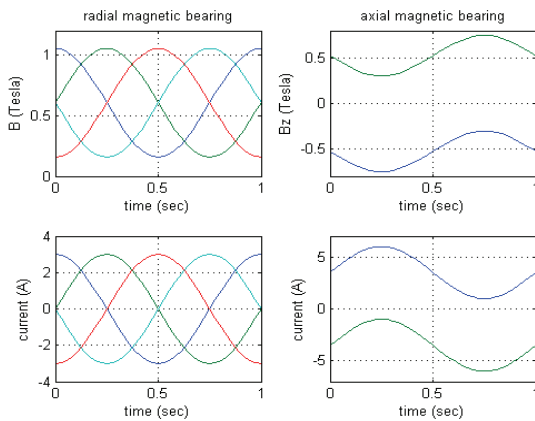
중심에 위치시키고 제어전류를 변화시키며 자기력을 구하였다. 즉 바이어스 전류 $i_b=3.5\text{A}$ 를 축 방향 코일에 인가하고 축 방향 제어전류 i_{cz} 와 반경방향



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 6 Flux density simulation with 1D circuit model

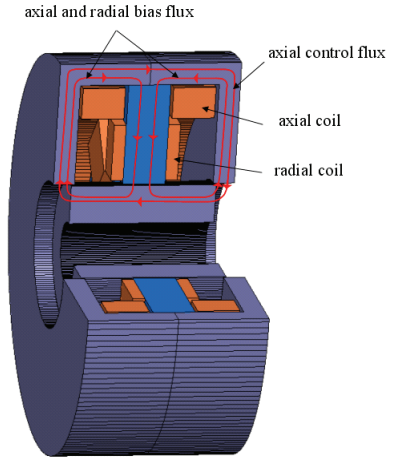


Fig. 7 Cutaway view of the bearing assembly

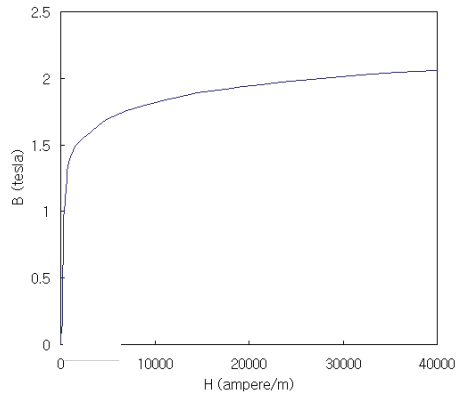


Fig. 8 B-H curve of the core material

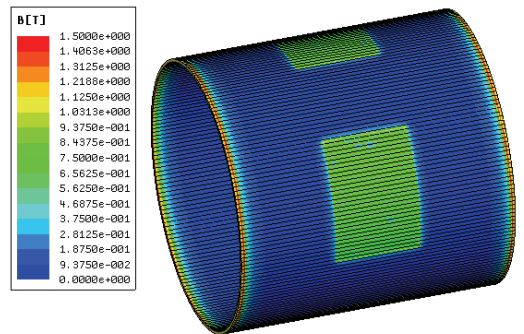


Fig. 9 Bias flux densities at radial air gaps

제어전류 i_{cx} 를 증가시키고 자기력 변화를 계산하였다. 일체형 자기베어링의 제어전류에 따른 자기력의 변화는 Fig. 13에 보여진다. Fig. 13은 전류변화에 따른 축 방향 및 반경방향 자기력 모두 선형적으로 거동함을 보여준다.

위치에 따른 자기력 변화를 계산하기 위해 바이어스 전류 $i_b=3.5$ A를 축 방향 코일에 인가하고 반경방향 및 축 방향 제어전류는 0으로 주고 회전자는 각각 반경방향과 축 방향으로 편심된 위치에서 자기력이 계산되었다. 위치변화에 따른 자기력은 Fig. 14에 보여진다. Fig. 14는 위치변화에 따른 축 방향 자기력은 거의 0에 가깝게 계산됨을 보여준다.

이 결과는 Fig. 3(a)와 같이 축 방향 고정자와 회전자를 0.5 mm 서로 겹치게 배치하여 최대 0.3 mm 편심된 상태에서도 0.2 mm 서로 겹치기 때문에 축 방향으로 맥스웰 힘이 작용하지 않기 때문이다.

제한된 일체형 자기베어링은 반경방향 자기베어링과 축방향 자기베어링의 자기회로가 서로 연결되어 있어 연성효과의 영향을 확인하는 것이 필요하다. 반경방향 자기베어링과 축방향 자기베어링 사이의

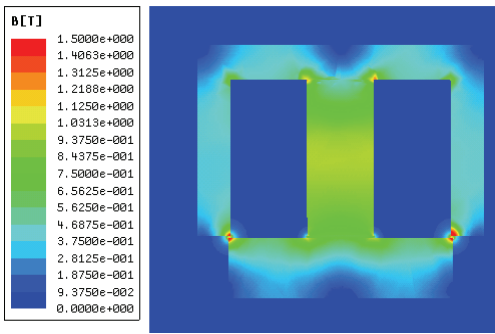


Fig. 10 Bias flux densities in the bearing

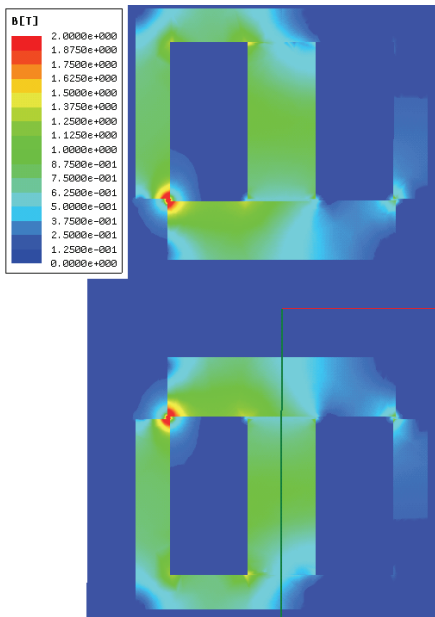


Fig. 11 Flux densities in the axial bearing unit

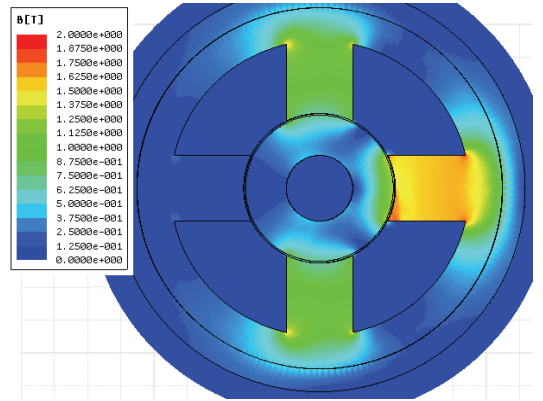


Fig. 12 Flux densities in the radial bearing unit

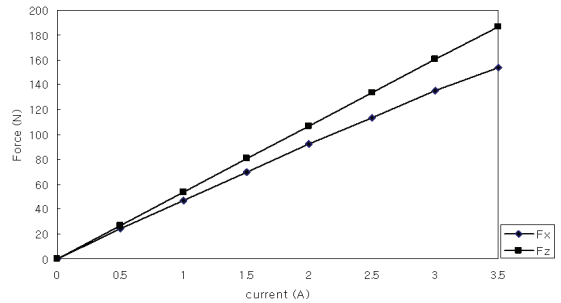


Fig. 13 Current forces with control current

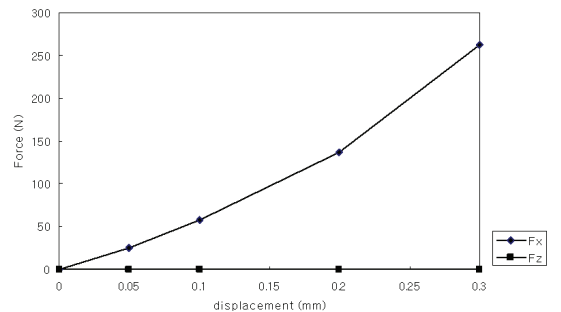


Fig. 14 Position forces with rotor offset position

Table 1 Calculated magnetic forces with currents

i_{cx} (A)	i_{cz} (A)	F_x (N)	F_z (N)
3	0	135.5	0
0	2	0	107
3	2	133.15	112.1
4	0	168	0
0	3.5	0	186
4	3.5	152.7	180.2

자기 연성효과를 알아보기 위하여 바이어스 전류 $i_b=3.5$ A를 인가하여 바이어스 자속을 형성하고 반경방향과 축방향 자기력을 동시에 발생시키기 위하여 i_{cx} 와 i_{cz} 를 변화시키며 자기력을 계산하였다. 각각의 제어전류 입력에 대한 자기력 계산 결과는 Table 1에 보여진다. 최대자기력 조합인 $i_{cx}=4$ A, $i_{cz}=3.5$ A가 동시에 인가 되었을 때 반경방향 자기력 $F_x=152.7$ N과 축 방향 자기력 $F_z=180.2$ N이 계산되었고 이는 반경방향 또는 축 방향에만 전류를 인가하고 계산된 최대 자기력 $F_x=168$ N과 $F_z=186$ N과는 약간의 차이를 보인다. 이 결과는 반경방향과 축 방향 자기력 사이에 연성효과가 미약함을 보여준다.

전류 입력 $i_{cx}=4$ A, $i_{cz}=3.5$ A가 동시에 인가 되었을 때 축방향 자기베어링과 반경방향 자기베어링에서의 자속밀도는 Fig. 15와 Fig. 16에 보여진다. 반경방향 또는 축 방향에만 전류를 인가하고 계산된 자속 밀도 Fig. 11과 Fig. 12에 비해 반경방향 고정자와 축 방향 고정자에 자속이 증가함을 알 수 있다.

5. 결 론

기존에 제시된 영구자석 바이어스 디스크 없는 일체형 자기베어링⁽⁹⁾은 킬러턴스 힘을 이용하여 축방향 디스크를 없앤 구조로 분해 조립과 유지보수가 용이하고 에너지 절감에 유리한 장점이 있으나 영구자석 사용으로 인해 바이어스 자속이 고정되어 초기 부상 시에 강한 음강성(negative stiffness)을 유발할 수 있어 제어의 유연성이 떨어진다. 제안된 전자석 바이어스 디스크 없는 반경방향-축 방향 일체형 자기베어링 모델은 영구자석을 대체하여 2개의 전자석 코일을 독립적으로 제어하여 동극형 반경방향 자기베어링과 축 방향 자기베어링에 바이어스 자속을 공급하는 방식으로 일정량의 바이어스 전력소모가 요구되지만 바이어스 자속의 조절을 통하여 제어의 유연성을 확보할 수 있다.

이 논문에서는 킬러턴스 힘을 이용한 디스크 없는 일체형 자기베어링의 구조와 원리를 제시하고 자기베어링의 퍼미언스 모델을 통한 1D 자기회로를 해석하고 유한요소 모델의 수치해석을 통하여 일체형 자기베어링의 하중능력과 선형성 등 성능 해석을 수행하였다. 제시된 디스크 없는 일체형 자기베어링

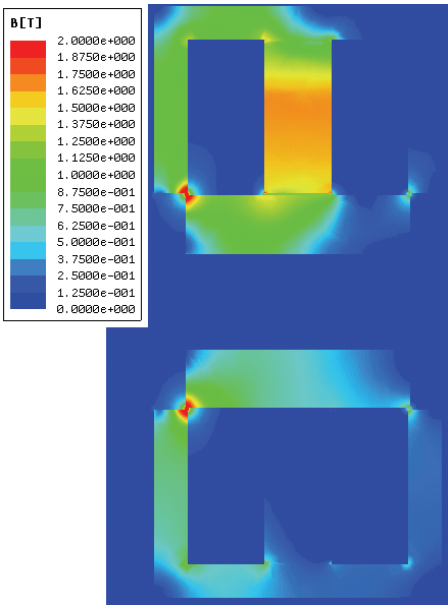


Fig. 15 Flux densities in the axial bearing unit with maximum currents

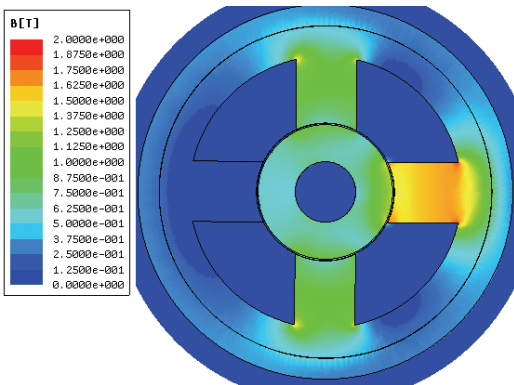


Fig. 16 Flux densities in the radial bearing unit with maximum currents

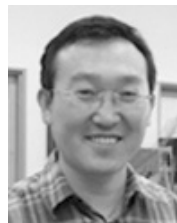
은 분해 조립이 용이하고 로터 회전체동력학 성능을 향상시킬 수 있어 각종 터보기계에 적용될 수 있다. 향후 연구계획은 이 논문에서 제시된 일체형 베어링의 시험기를 제작하고 제어시스템의 성능실험을 할 예정이다.

후 기

이 연구는 산학협동재단 연구사업의 지원에 의한 것이며 관계자 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Chang, I.-B. and Han, D.-C., 1995, Performance 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) 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.
- (4) 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, No. 4, pp. 839~846.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Hijikata, K., Kobayashi, S., Takemoto, M., Tanaka, Y., Chiba, A. and Fukao, T., 2008, Basic Characteristics of an Active Thrust Magnetic Bearing with a Cylindrical Rotor Core, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, pp. 4167~4170.
- (9) Hijikata, K., Takemoto, M., Ogasawara, S., Chiba, A., 2009, Behavior of a Novel Thrust Magnetic Bearing with a Cylindrical Rotor on High Speed Rotation, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 10, pp. 4617~4620.
- (10) Na, U. J., 2012, Design and Analysis of a New Permanent Magnet Biased Integrated Radial-axial Magnetic Bearing, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13, No. 1, pp. 133~136.
- (11) Roters, H. C., 1941, Electromagnetic Devices, Wiley, New York.



Uhn Joo Na received Ph. D in mechanical engineering at Texas A&M University in 1999. He worked at KIMM as a senior researcher in 2002 before he joined Kyungnam university in 2004. He is an associate professor at Mechanical Engineering Dept. His research interests are rotordynamics, magnetic bearings, vibration control, and haptic teleoperation.