

< 논문 >

반경방향-축방향 일체형 4극 전자기 베어링의 설계 (I) - 바이어스 자속 독립형 -

김 하 용* · 김 승 종†

(2005년 3월 4일 접수, 2005년 11월 22일 심사완료)

Design of Combined Radial and Axial 4-pole Electromagnetic Bearing (I) - with Uncoupled Bias Flux -

Ha-Yong Kim and Seung-Jong Kim

Key Words : Active Magnetic Bearing(능동 자기 베어링), Lorentz Force(로렌츠 력), Homopolar Magnetic Bearing(호모폴라 자기 베어링)

Abstract

In this paper, a new compact active magnetic bearing(AMB) is proposed in which radial and axial bearings are integrated in one bearing unit. It consists of four U-shaped cores circumferentially connected by yokes and two-layer coils for radial and axial controls. For the radial control action, it has the same principle as conventional homopolar AMBs, while for the axial control, it uses the Lorentz force generated by the interaction of the bias flux for radial control and the axial control flux. The proposed structure makes it easy to design a compact AMB because it has no disk for axial control. This paper introduces the proposed structure, principle, and design process based on the magnetic flux analysis. By using a control algorithm with feedforward action to compensate the coupled flux effect, the feasibility of the proposed AMB is experimentally verified.

1. 서 론

일반적으로 축 방향 전자기 베어링은 코일이 감긴 한 쌍의 고정자와 그 사이의 디스크로 구성되고, 영구 자석을 함께 이용하는 하이브리드 구조에서도 축보다 직경이 큰 디스크의 장착은 필수적이다. 이러한 디스크의 존재로 인하여 자기 베어링의 소형 경량화가 어렵고, 설계 및 조립이 번거로우며, 최고 속도 제한 문제와 고속에서 동특성에 끼치는 악영향 등, 소형 정밀 구동 시스템에의 적용 시 여러 가지 문제들이 야기된다. 디스크를 제거하고 전자기 베어링을 소형화하기 위한 종래의 연구로는, 회전축과 고정자 코어를 원추 형태로 제작하여 반경 방향과 축 방향을 동시에 제

어하는 방법이 제안되었으나 규소 강판의 적층 및 가공이 복잡하고 각 방향과의 연성 효과가 큰 단점이 있었고,^(1,2) 영구 자석과 전자석을 함께 이용하는 하이브리드 전자기 베어링에서 소형화를 위해 영구 자석의 자속을 이용한 수동(passive)형 축 방향 베어링이 제안된 바 있으나, 수동형 부상은 감쇠가 작은 단점이 있다.⁽³⁾ 한편, 전자기 베어링과 모터가 기능적으로 결합된 셀프-베어링 모터에서는 회전축의 회전과 부상에 인력이 아닌 로렌츠 힘(Lorentz force)을 이용하는 연구가 활발한데,^(4,5) 호모폴라 전자기 베어링 시스템에 이를 응용한, 로렌츠 힘을 이용한 축 방향 전자기 베어링도 제안된 바 있다.⁽⁶⁾ 축 방향 베어링 설계가 간단하고 디스크를 완전히 제거할 수 있는 장점에 비해, 항상 두 개 이상의 자기 베어링 유닛이 바이어스 자속을 공유하여야 하므로 회전축과 하우징에 특성이 좋은 자성 재료가 요구되는 제약이 있다.

본 논문에서는 단일 베어링 유닛에서 반경 방향 및 축 방향 전자기 베어링이 구현된 복합 전자

† 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원
E-mail : sjongkim@kist.re.kr
TEL : (02)958-5610 FAX : (02)958-5659

* 삼성중합기술원 HDD Program team

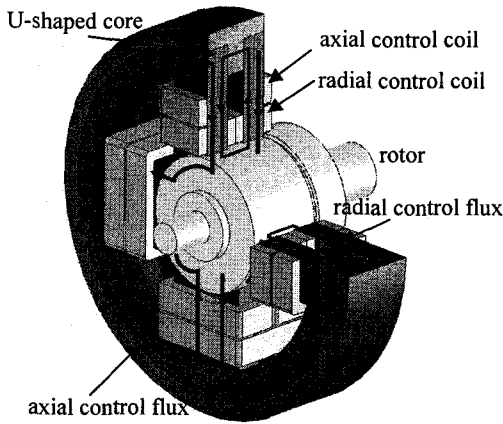
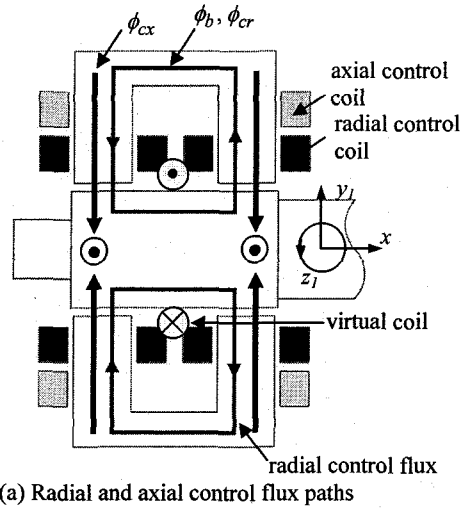


Fig. 1 Structure of the proposed magnetic bearing

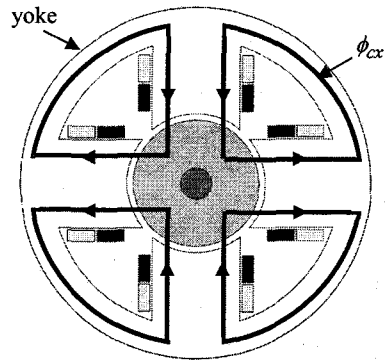
기 베어링을 제안한다. 반경 방향 제어를 위해서는 기존의 호모폴라 전자기 베어링과 같은 원리를 적용하지만 극성 배열은 호모폴라가 아닌 4 극으로 하고, 축 방향 제어를 위해서는 반경 방향 제어용으로 인가된 바이어스 전류와 축 방향 제어 자속 사이에 발생하는 로렌츠 힘을 사용하는 것이 특징이며, 독립적인 권선 구조를 통하여 각 방향에 대해 비연성된 제어가 가능하다. 제안된 복합 전자기 베어링의 기본 원리와 반경 방향 및 축 방향 힘에 대하여 이론적으로 유도하였으며, FEM 해석 및 실험을 통하여 제안된 전자기 베어링의 안정된 부상 성능을 검증하였다.

2. 복합 전자기 베어링 구조 및 원리

설계된 전자기 베어링의 한 유닛은 Fig. 1 과 같이 4 개의 U 자형 코어와 12 개의 코일로 구성되어 있다. 각 코어는 원주방향으로 연결되어 있고, 반경 방향과 축 방향 제어를 위한 코일이 복층으로 권선되어 있다. 반경 방향 제어는 기존의 호모폴라 자기 베어링과 동일하게, 각 코어에서 독립적으로 흐르는 같은 크기의 바이어스 자속에, 축의 위치에 따라 마주보는 한 쌍의 코어에서의 제어 자속을 가감함으로써 이루어진다. 한편, 위의 바이어스 전류는 Fig. 2(a)에 도시된 바와 같이 코어의 중앙에 위치한 가상의 코일로 증가될 수 있는데, 이 증가 코일에 일정 방향으로 자속이 작용하도록, 축 방향 제어 전류를 공급하면 위의 증가 코일은 축 방향의 로렌츠 힘을 받는다. 이 때 코일은 고정되어 있으므로 그 반작용으로 축에 반작용력이 작용하며, 위의 자속의 크기와 방향을 제어함으로써 축 방향 제어력을 얻을 수 있다. 축 방향 제어 전류에 의해 생성된 자속은 U 자 코어의 두 다리를 같은 방향으로 흐르되, 마주보는 두



(a) Radial and axial control flux paths



(b) Axial control flux path

Fig. 2 Magnetic flux paths

U 자형 코어에서 같은 방향의 로렌츠 힘이 발생하도록 자극면의 극성이 모두 같아지는 방향으로 흐르며, Fig. 2(b)와 같이 이웃하는 코어들과 요크를 지나가는 폐회로를 구성한다. 여기서 주목할 점은 각 축 방향 제어용 코일은 모두 연결함으로써 기존의 전자기 베어링에 비해 앰프 및 제어 채널 수가 증가하지 않도록 할 수 있는 반면, Fig. 2(b)에서 보듯이 상하 코어와 좌우 코어에서 자극면의 극성이 반대가 되므로 이에 따라 반경 방향 제어 코일에 흐르는 바이어스 이에 따라 반경 방향 달라져야 한다는 것이다. 이는 곧, 제안된 자기 베어링의 반경 방향 제어 원리가 호모폴라 자기 베어링과 동일하지만, 호모폴라가 아닌 4 극으로 설계된 이유이다. 한편, 각 방향 제어 시 연성 효과를 검토하면, 반경 방향 제어 전류가 인가되어도 마주보는 코어에서 증가 코일에 흐르는 전류의 합은 일정하므로, 축 방향 제어는 독립적으로 가능한 반면, 축 방향 제어 자속은 반경 방향 제어에 외란으로 작용하게 되므로 이를 고려한 제어기 설계가 필요하다.

3. 자기 회로 해석

Fig. 2(a)에서와 같이 정의된, 바이어스 자속 ϕ_b 과 반경 방향 제어 자속 ϕ_{cr} , 축 방향 제어 자속 ϕ_{cx} 들이 공극을 지날 때, y_1 방향으로의 반경 방향 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

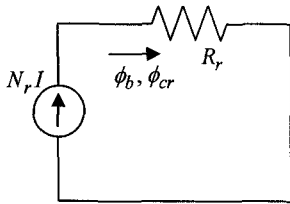
$$F_{y1} = \frac{1}{\mu_o A_g} \left\{ (\phi_b + \phi_{cr})_I^2 - (\phi_b - \phi_{cr})_{III}^2 \right\} + \frac{1}{\mu_o A_g} \left\{ (\phi_{cx}^2)_I - (\phi_{cx}^2)_{III} \right\} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{\mu_o A_g} \left\{ (\phi_b + \phi_{cr})_I^2 - (\phi_b - \phi_{cr})_{III}^2 \right\} + f_d$$

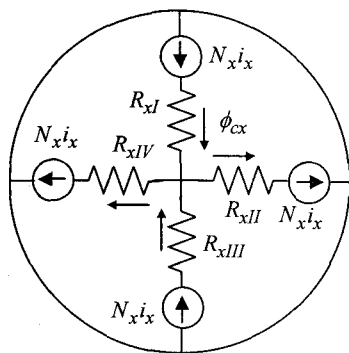
여기서,

$$f_d = \frac{1}{\mu_o A_g} \left\{ (\phi_{cx}^2)_I - (\phi_{cx}^2)_{III} \right\}$$

여기서, $\mu_o (= 4\pi \times 10^{-7} H/m)$ 는 공기중의 투자율, A_g 는 코어 단면적, 하첨자 I 과 III 은 마주보는 한 쌍의 전자석을 뜻한다. Fig. 3 의 반경 방향 자기 회로 모형을 통하여 바이어스 자속과 반경 방향 제어 자속은 다음과 같이 표현된다.



(a) Magnetic circuit for bias and radial control fluxes



(b) Magnetic circuit for axial control flux

Fig. 3 Magnetic circuit models

$$\phi_b = \frac{2N_r I_b}{R_r}, \quad \phi_{cr} = \frac{2N_r i_r}{R_r} \quad (2)$$

$$\frac{1}{R_{rI}} = \frac{\mu_o A_g}{2(g_o - y_1)}, \quad \frac{1}{R_{rIII}} = \frac{\mu_o A_g}{2(g_o + y_1)} \quad (3)$$

여기서, N_r 는 반경 방향 제어 코일의 권선수, I_b 와 i_r 는 각각 바이어스 전류와 반경 방향 제어 전류, g_o 는 반경 방향의 등가 공극이다. 축 방향 제어 자속은 y 와 z 방향을 통하여 흐르는 폐회로를 이루므로, Kierchoff 의 법칙에 의하여 Fig. 3(b) 의 자기 회로 모형을 통하여 구할 수 있다. 자기 저항 값은 축의 변위가 y_1, z_1 만큼 변하는 경우에 대한 값이다.

$$\frac{1}{2\mu_o A_g} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 \\ g_o - y_1 & g_o - z_1 & 0 & 0 \\ g_o - y_1 & 0 & 0 & g_o + z_1 \\ 0 & g_o - z_1 & g_o + y_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\phi_{cx})_I \\ (\phi_{cx})_{III} \\ (\phi_{cx})_{III} \\ (\phi_{cx})_{IV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2N_x i_x \\ 2N_x i_x \\ 2N_x i_x \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, N_x 은 축 방향 제어 코일의 권선수, i_x 는 축 방향 제어 전류이다. 식 (4)를 통하여 축 방향 제어 시 인가되는 자속을 계산할 수 있다.

$$(\phi_{cx})_I = \frac{4\mu_o A_g N_x i_x (g_o + y_1)}{2g_o^2 - y_1^2 - z_1^2} \quad (5)$$

$$(\phi_{cx})_{III} = \frac{4\mu_o A_g N_x i_x (g_o - y_1)}{2g_o^2 - y_1^2 - z_1^2}$$

식 (1)에서 반경 방향 변위, y_1 과 z_1 가 정상 상태 등가 공극에 비해 매우 작고, 제어 전류가 바이어스 전류에 비해 매우 작다고 가정하면, 테일러 시리즈(Taylor series)를 이용하여 반경방향 전자기력의 선형화 가능하다.

$$F_{y1} \approx K_{y1} y_1 + K_{i_{y1}} i_{y1} + f_d \quad (6)$$

$$f_d = K_{y1x} y_1$$

여기서, 선형화 식으로부터 각각의 변위 강성(position stiffness)과 전류 강성(current stiffness), 그리고 외란 강성(disturbance stiffness)은 다음과 같다

$$K_{y1} = \frac{4\mu_o A_g N_r^2 I_b^2}{g_o^3}, \quad K_{i_{y1}} = \frac{4\mu_o A_g N_r^2 I_b}{g_o^2}$$

$$K_{rx} = \frac{4\mu_o A_g N_x^2 i_x^2}{g_o^3} \quad (7)$$

한편, 축 방향 로렌츠 힘은 바이어스 전류에 의

한 공극에서의 자속 밀도와 축 방향 제어 코일의 기자력(magneto-motive force)에 의해서 결정되는데, 공극에서의 축 방향 제어 자속밀도는 다음과 같이 유도된다.

$$B_x = \frac{2N_x i_x}{2A_g R_x} = \frac{\mu_o N_x i_x}{g_o} \quad (8)$$

식 (2)와 (8)에서 계산되는 자속 밀도값을 검증하기 위하여 FEM 해석을 수행하였다. Fig. 4 에 나타낸 것과 같이 바이어스 전류만을 인가되었을 때 공극에서의 자속 밀도는 0.21T 로서 식 (2)로부터 계산되는 값 0.24T 와 근사한 값을 보인다. 즉, 단순화된 자기 회로에 의한 해석이 설계 변수 선정을 위해 유용한 방법임을 확인할 수 있다. 이 때의 바이어스 전류는 1.3A 이다.

Fig. 5 는 Fig. 4 와 동일한 모델에 대해서 바이어스 전류에 추가로 축 방향 제어 전류를 증가시키면서 축 방향으로 발생하는 전자기력을 계산한 결과이다. 전류와 축 방향 전자기력이 선형 관계를

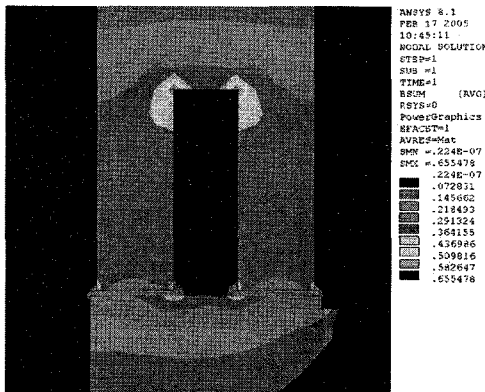


Fig. 4 Magnetic flux density for radial force

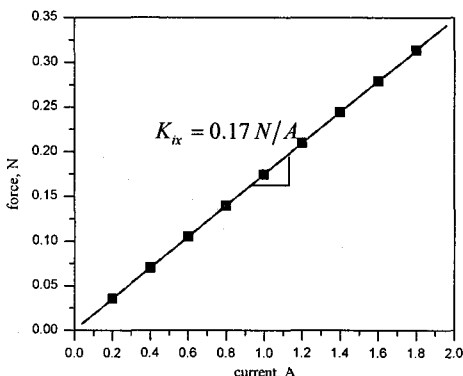


Fig. 5 Axial force versus current

갖는 것을 확인할 수 있으며, 이는 로렌츠 힘의 특징과 일치한다. 따라서, 축방향 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_x \approx K_{ix} i_x \quad (9)$$

여기서, K_{ix} 는 축 방향 전류 강성(current stiffness)으로서 정의되며, 해석 결과 0.17 N/A 로 계산되었다.

4. 외란 보상 제어기 설계

회전축을 부상시키기 위하여 두 세트의 복합 전자기 베어링으로 이루어진 시스템을 구성하였다. 선형화된 식 (6)을 기본으로 베어링 고정 좌표계에 대한 반경 방향 운동 방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{q} + Kq = f_c + f_d \quad (10)$$

$$K = \text{diag}[K_{y1} \quad K_{y2} \quad K_{z1} \quad K_{z2}]$$

$$f_c = \text{diag}[K_{iy1} \quad K_{iy2} \quad K_{iz1} \quad K_{iz2}]$$

$$q = \{y_1 \quad y_2 \quad z_1 \quad z_2\}^T$$

여기서, M 는 질량 행렬, K 는 위치강성 행렬, f_c 는 전류 강성 행렬이다. 외란 벡터 f_d 는 축 방향 제어 전류가 반경 방향 제어력에 영향을 주는 부분이다.

전자기 베어링에서 발생하는 음의 강성 [식 (10)의 위치강성]을 보상하기 위하여 기본적인 피드백 제어를 설계한 후, 축 방향 제어에 의해 발생하는 외란을 보상하기 위하여 피드포워드 제어기를 추가하였다. 식 (10)의 베어링 고정 좌표계에서 각 반경 방향 변위에 대하여 독립적으로 설계된 비례-미분 피드백 제어기가 포함된 운동 방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{q} + K_s K_A K_d K_i \dot{q} + (K_s K_A K_p K_i + K)q = f_d \quad (11)$$

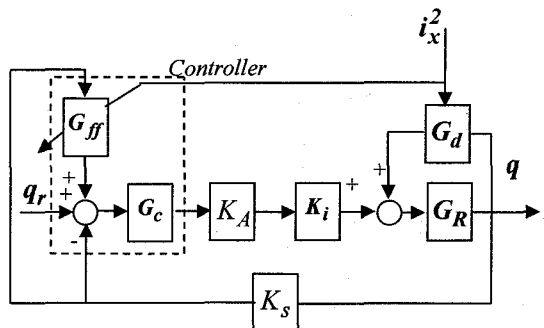


Fig. 6 Block diagram of radial control

여기서, K_s 는 변위 센서의 이득, K_A 는 전력 증폭기 이득, K_p , K_d 는 비례 이득 및 미분 이득 행렬이다.

Fig. 6은 식 (11)의 피드백 제어 시스템과 축 방향 제어 자속의 영향을 보상하기 위한 피드포워드 제어기가 포함된 제어 블록 선도이다. 그림에서, G_c 는 비례-미분 제어기의 전달 함수, G_R 는 시스템 전달 함수, G_d 는 외란, G_{ff} 는 피드포워드 제어기의 전달함수로서 식 (12)와 같이 주어진다.

$$G_{ff} = -(K_s K_A K_i G_c)^{-1} G_d \quad (12)$$

전달함수 G_d 의 모형화가 정확히 이루어진다면, 축 방향 제어 전류에 의한 영향은 완벽하게 보상되어 질 것이다. 하지만, 이 방법은 정확한 모형화, 특히 전류 강성 K_i 의 정확한 예측이 어려우므로 이는 피드포워드 제어기 성능의 주요 변수가 된다.

축 방향 제어는 반경 방향 제어와 연성되지 않으므로 1 자유도에 관련된 간단한 피드백 제어를 설계하였다.

$$m\ddot{x} = F_x \quad (13)$$

여기서, m 은 전체 축의 질량이며, 축 방향 전자기력 F_x 는 식 (9)에 나타내었다. 로렌츠 힘은 맥스웰 힘과 달리 음의 강성을 갖지 않아 안정화된 제어력을 발생시킬 수 있으므로, 비례-미분 제어를 통하여 강성과 감쇠 값을 조절한다.

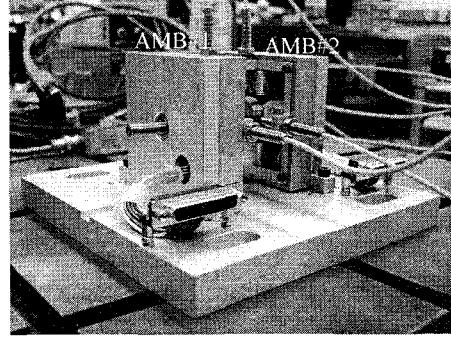
$$\ddot{x} = -K_s K_A (K_{px}x + K_{dx}\dot{x}) \quad (14)$$

K_{px} 와 K_{dx} 는 축 방향 비례, 미분 이득이며 식 (13)과 (14)로부터 다음과 같은 잘 알려진 방정식을 얻어진다.

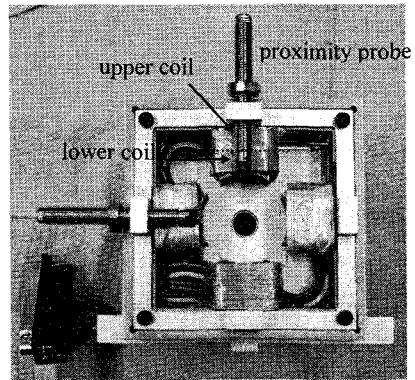
$$m\ddot{x} + nK_s K_A K_{dx} K_{ix} \dot{x} + nK_s K_A K_{px} K_{ix} x = 0 \quad (15)$$

5. 실험

Fig. 7은 본 논문에서 제안된 원리를 실험적으로 검증하고자 시제작된 복합 전자기 베어링이다. 제안된 원리는 단일 베어링 유닛에서 두 반경 방향과 축 방향으로 힘 발생이 가능하지만 회전축을 지지하기 위하여 두 베어링 유닛으로 제작하였다. 고정자 및 회전축의 코어는 규소강판을 적층하여 제작하였고 두 층의 코일이 각각 60회씩 감겨져 있다. 설계된 전자기 베어링의 기본 사양은 Table 1에 나타내었다. 로렌츠 힘을 이용하는 축 방향은 전류 강성만이 나타난다. 제작된 전자기 베어링 시제품의 부상 실험을 위해서, 5개의 비접촉 변위



(a) AMB system



(b) stator

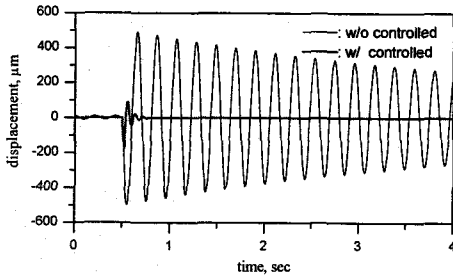
Fig. 7 Prototype of the proposed AMB

Table 1 Design parameters

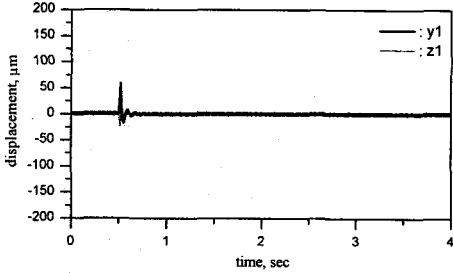
Parameter		Value
pole face area		102 mm ²
air gap		0.4 mm
rotor diameter		30 mm
No. of coil turns	upper	60
	lower	60
radial	position stiffness	4.87×10 ⁴ N/m
	current stiffness	15 N/A
axial current stiffness		0.17 N/A
bias current		1.3 A
rotor mass		0.28 kg

센서와 9채널의 선형 증폭기(반경 방향: 4개/unit × 2 units, 축 방향: 1개), 파워 PC board(dSpace Inc, DS1105)를 사용한 디지털 제어기로 이루어진 5 자유도 제어 시스템을 구축하였다.

FEM 해석 결과를 바탕으로 실험을 통하여 제안된 방법의 전자기 베어링 성능을 알아보기 위하여, 축 방향(x-direction)과 반경 방향(y-direction)에 대하여 충격 실험을 수행한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 반경 방향으로는 약 0.2 초, 축 방

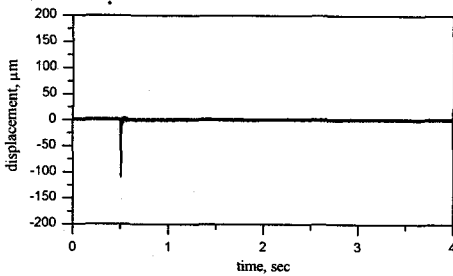


(a) x direction

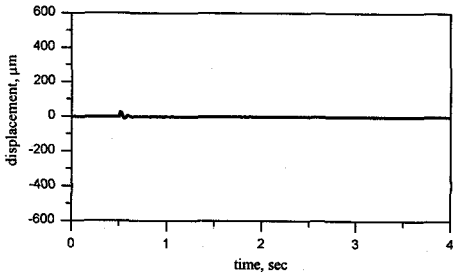


(b) y, and z direction

Fig. 8 Response to x directional impulse



(a) y direction



(b) x direction

Fig. 9 Response to y directional impulse

향으로는 0.3 초 후에는 진동이 감쇠되어 응답이 안정화됨을 알 수 있다. Fig. 8(a)에서 보이듯이, 축 방향에 대해서 제어가 되지 않는 경우에는 충격에 의한 응답이 약 30 초 동안 지속된다. 참고로, 축 방향에 대한 비제어 시와 제어 시의 고유값(eigenvalue)은

각각 $\lambda_{uc1,2} = -0.28 \pm 30.7j$ 와 $\lambda_{c1,2} = -25.6 \pm 82.7j$ 이다.

또한, 축 방향에 대한 반경 방향의 연성 효과는 피드포워드 제어를 통하여 잘 보상되고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 소형 전자기 베어링의 문제점 중 하나인 축 방향 제어용 디스크를 제거함으로써 공간의 활용성을 높일 수 있는 반경 방향-축방향 복합 전자기 베어링을 제안하였고, 그 부상 원리를 실험을 통하여 검증하였다. 구조적으로는 4 극 헤테로폴 구조와 호모폴 구조가 복합된 형태이며 축 방향 제어를 위해 로렌츠 힘을 이용한다는 점이 주요 특징이다. 반경 방향과 축 방향 전자기력 및 제어기 설계는 단순화된 자기 회로를 기초로 수행되었으며, 축 방향 제어에 의해 발생하는 반경 방향의 연성 효과를 보상하기 위하여 피드포워드 제어를 설계하였고, 실험적으로 그 효과를 확인하였다.

참고문헌

- (1) Lee, C. W. and Jeong, H. S., 1996, "Dynamic Modeling and Optimal Control of Cone-Shaped Active Magnetic Bearing System," *Control Engineering Practice*, 4, pp. 1393~1403.
- (2) 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," *2nd Int. Sym. on Magnetic Bearings*, Tokyo, Japan, pp. 12~14.
- (3) Komori, M. and Yamane, T., 2000, "Magnetic Levitation System with a Millimeter Sized Cylindrical Rotor," *Mechatronics*, 10, pp. 595~607.
- (4) Han, W. S., Lee, C. W. and Okada, Y., 2002, "Design and Control of a Disk-Type Integrated Motor-Bearing System," *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 7(1), pp. 15~22.
- (5) Kim, S. J., Abe, K., Kanebako, H., Okada, Y. and Lee, C. W., 2002, "A Lorentz Force Type Self-Bearing Motor with New 4-Pole Winding Configuration," *8th Int. Sym. on Magnetic Bearings*, Mito, Japan, pp. 35~40.
- (6) Kim, H. Y. and Lee, C. W., 2003, "Design and Control of Active Magnetic Bearing System with Lorentz Force-type Axial Actuator," *ASME2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, Illinois, USA, September, 48542.