

자기베어링시스템 강성의 실험적 고찰을 통한 안정화 특성에 관한 연구

강성구*, 강종규+, 홍준희**

A study and experiment on the stabilization characteristic and the stiffness in
Active Magnetic Bearing

Seong-gu Kang*, Jong-gyu Kang⁺, Jun-hee Hong⁺⁺

Abstract

Due to the lack of stiffness and difficulties of control, it is hard to achieve well balanced magnetic levitation. In this paper, we analysis the current and position stiffness change according to bias current through experiment. Then, compensation equations were presented. After obtaining PD gain for each bias current and PD gain region through levitation experiment, we consider the characteristics.

Key Words : Magnetic Bearing(자기베어링), Stiffness(강성), Stability Regions(안정영역), Fringing Flux(프린징 플럭스)

1. 서론

자기베어링은 전자석의 자기력을 이용하여 회전체를 비 접촉 지지하는 것으로 고속 회전이 가능하고 반영구적인 수명을 가지며 윤활이 필요하지 않아 청정성이 매우 높다. 또한 자기베어링은 전자기력을 제어함으로써 축의 회전을 매우 높은 정밀도로 유지할 수 있고, 베어링의 강성 및 감쇠가 제어기의 계인에 의해 조정되므로 임계속도 이상으로 안정된 가속이 가능하며, 운전중 회전 상태를 쉽게 모니터링 할 수 있다. 이러한 이점으로 1957년 프랑스에서 능동 자기 부상계가 완성된 이래 여러 선진국에서는 개발에 성공하여 연삭기, 터어빈, 진공펌프, 원심분리기, 공작기계의 주축 등의 각종 산업기계에 적용하여 실용화가 이루어지고 있다. 국내에서도 관련 연구가 수년간에 걸쳐 진행

되었고 현재에는 일부 산업기계에 적용단계까지 이르렀다. 하지만 자기베어링의 안정적인 부상을 위해 전자석의 흡인력을 이용하였을 경우에는 높은 강성을 얻기가 힘들고 회전 중심을 정밀하게 유지하기 위한 고도의 제어기술이 필요로 하게 된다⁽¹⁾

본 논문은 바이어스전류에 따른 강성의 변화를 실험적으로 비교분석하고, T.A.Lipo⁽³⁾에 의해 제시된 자기회로상의 보정 자극 면적을 자기베어링에 적용하여 실제 시스템 강성에 보다 근사(approximated)한 보정식을 제시한다.

시스템의 특성방정식으로부터 바이어스가 다른 각각의 경우에 대해서 이론적으로 비례-미분 계인영역을 구하고 부상실험을 통해 비례-미분 계인 영역을 구하여 이론적 특성과 실험적 특성에 대해 비교 고찰한다.

* 충남대학교 기계공학과 대학원(omgksg@naver.com)
주소: 305-764 대전광역시 유성구 궁동 충남대학교 220
+ 충남대 기계공학과 대학원
++ 충남대 기계공학과

2. 자기베어링 강성

2.1 전자기적 해석

Fig. 1(a)는 일반적인 반경방향 자기베어링의 형태이며, Fig. 1(b)에서와 같이 하나의 전자석에서 생성되는 전자기력은 다음과 같다.

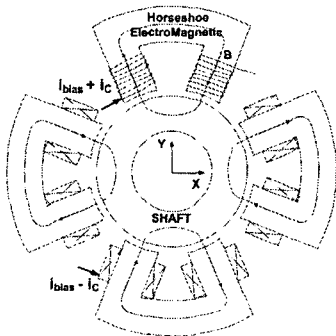
$$F_{\beta} = \frac{\mu_0 AN^2 i^2}{2g^2} \cos\theta \quad (\theta = 22.5^\circ) \quad (1)$$

$$i = I \pm i_{c\beta}, \quad g = g_0 \mp \beta \cos\theta$$

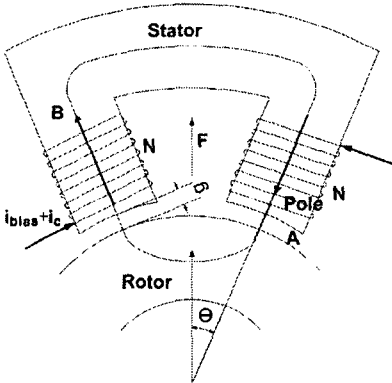
($\beta: x$ or y)

여기서, μ_0 는 자유공간 투자율, A 는 자극면적, N 은 코일의 감은 수, I 는 바이어스 전류, g_0 는 정상상태 공극, $i_{c\beta}$ 와 β 는 전류와 변위의 미소 변화량이다

이 때 공극(air gap)은 스테이터와 로터사이의 작은 틈을 의미한다.



(a) Radial Magnetic Bearing



(b) Geometry of Electromagnet and rotor
Fig 1. Schema of electromagnet and rotor

작동점(Nominal Operating Point, $\beta=0$, $i_{c\alpha}=0$)에 대하여 Taylor급수 전개 후 1차항만을 고려하면 다음과 같이 자기력을 선형화 시킬 수 있다⁽¹⁾.

$$F_{\beta} \approx F_{\beta 0} + K_{\beta} x + K_{i\beta} i_{c\beta} \quad (2)$$

여기서,

$$F_{\beta 0} = F_{\beta}(\beta, i_{c\beta})|_{\beta=0, i_{c\beta}=0} = \frac{\mu_0 A_g N^2 \cos\theta}{4g_0^2} (I_j^2 - I_k^2) \quad (3)$$

$$K_{\beta} = \left. \frac{\partial F_{\beta}(\beta, i_{c\beta})}{\partial \beta} \right|_{\beta=0, i_{c\beta}=0} = \frac{\mu_0 A_g N^2 \cos^2\theta}{2g_0^2} (I_j^2 + I_k^2) \quad (4)$$

$$K_{i\beta} = \left. \frac{\partial F_{\beta}(\beta, i_{c\beta})}{\partial i_{c\beta}} \right|_{\beta=0, i_{c\beta}=0} = \frac{\mu_0 A_g N^2 \cos\theta}{2g_0^2} (I_j + I_k) \quad (5)$$

$\beta=x$ 일 때 $j=Right$, $k=Left$

$\beta=y$ 일 때 $j=Top$, $k=Bottom$

위 식에서 $F_{\beta 0}$ 는 y 방향의 경우 회전체의 중량을 지지하기 위해 필요하며, x 방향의 경우 0가 되도록 오른쪽과 왼쪽 전자석에 같은 바이어스 전류를 인가한다. K_{β} 는 회전체의 전자석의 상대운동에 따른 공극의 변화에 대한 자기력의 변화로 위치강성(Position Stiffness, N/m)라 부르고, $K_{i\beta}$ 는 전류에 대한 자기력의 변화로 전류강성(Current Stiffness, N/A)이라 한다.

2.2 강성 실험

본 연구의 자기베어링 주축 시스템은 2방향의 병진운동, 2방향의 회전운동을 갖는 4자유도 시스템을 고려하였다.

회전축의 변위를 센서에서 감지하여 센서신호로 변환한다. 이를 제어기에서 제어신호로 변환하고, 전력증폭기에서 제어전류로 증폭되어 자기베어링의 제어전류에 비례하는 자기력이 작용하여 회전축을 명령값으로 복원시킨다.

y -방향에서 베어링 발생력의 일반식은 다음과 같다.

$$F_{\beta} = F_{\beta 0} + K_{\beta} y + K_{i\beta} i_y \quad (6)$$

Fig. 2과 같이 강성을 얻기 위하여 실제 시스템에 외력 F_d 를 가하고 y 방향의 힘과 모멘트의 평형을 이용하여 전류강성을 구한다. 다음으로 외력을 제거하고 임의의 참조값을 이용하여 위치강성을 구한다. 이를 통해 bias 전류에 따라 강성실험을 Fig. 2에서 F_d 를 수직방향으로 정적 힘 $0N$

부터 약 8N씩 증가하여 50N까지 가하여 센서로부터 미소 변위 측정하는 것으로 한다.

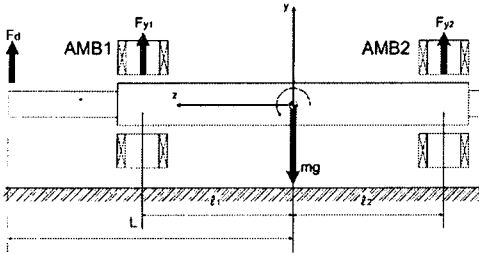
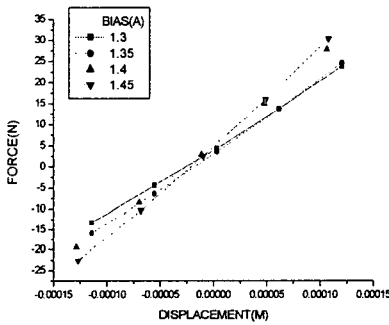
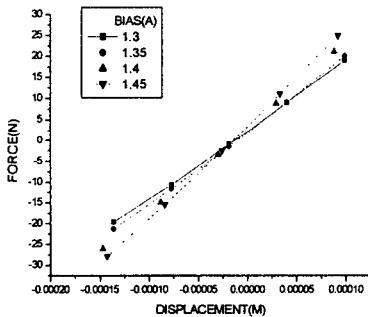


Fig 2. Model of the rigid rotor with applied forces and moments.

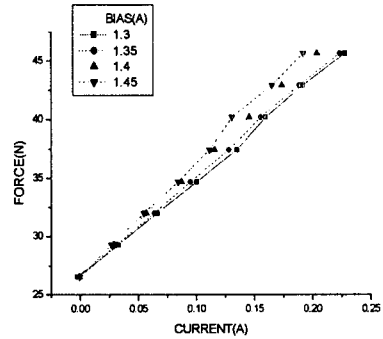
실험적으로 강성을 구한 결과 Fig. 3과 같이 얻을 수 있었다.



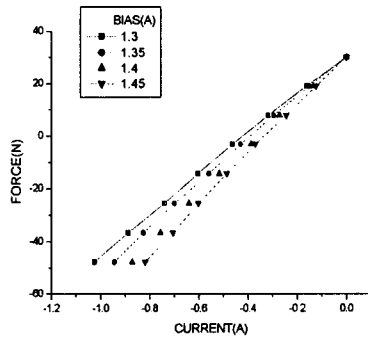
(a) AMB1 Position Stiffness



(b) AMB2 Position Stiffness



(c) AMB1 Current Stiffness



(d) AMB2 Current Stiffness

Fig. 3 Experimental results of stiffness

Fig. 3의 (a)와 (b)는 각 베어링의 위치강성, (c)와 (d)는 전류강성의 실험결과를 나타낸다. 그래프에서 직선의 기울기는 강성을 의미한다. 결과에서 보듯이 바이어스 전류가 증가할수록 강성이 커짐을 알 수 있다.

2.3 보정 강성식

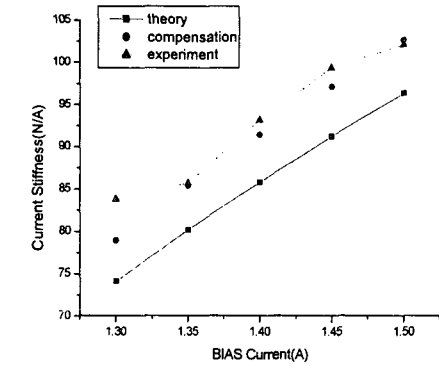
자기회로의 코어와 축 사이에는 작은 틈이 존재한다. 이때 자속밀도는 불규칙한 분포를 가진다. 또한 코어의 끝단에서는 프린징 플럭스가 존재한다. 플럭스가 퍼지는 현상 때문에 공극의 자기저항은 달라지게 된다. 공극이 코어 단면의 치수보다 작을 때, 단면적의 계산에 포함할 수 있다.

자기베어링의 강성은 전자석 코어의 자속밀도가 높을수록 크게 나타난다. 코어의 면적(A)에 대해서만 자속이 주어지는 것이 아니라 자기회로와 마찬가지로 프린징 플럭스가 형성되게 된다. 주축과 자극의 거리(g)가 변함에 따라서 자속의 면적을 고려해야 한다. 따라서 주축의 안정적인 부

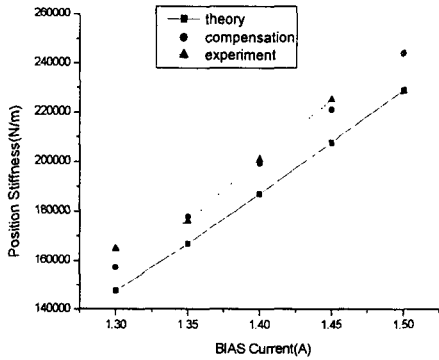
상을 위해서는 제어기에 이러한 영향을 반영해야 하고 자극의 가로를 a 라 하고 세로를 b 라 할 때, 자기회로에서 적용했던 보정식(Experiment Equation)을 도입한 결과 g 에 대한 보정 자극 면적은

$$A'_g = (a+g)(b+g) \quad (7)$$

이고, 실험결과는 Fig. 4와 같다⁽²⁾⁽³⁾.



(a) Current Stiffness



(b) Position Stiffness

Fig. 4 Theory Values, Compensation Values, Experiment Results

Fig. 4에 의하면 보정식을 이용한 강성이 이론식에 의한 결과보다 실험 데이터에 더 근접함을 알 수 있다.

3. 자기 베어링의 안정화 영역

자기베어링 시스템의 블록선도는 Fig. 5와 같이 나타낼

수 있다.

Fig. 5에서 자기베어링 페루프 시스템의 특성방정식을 $F(s)$ 라 하면 다음과 같이 구할 수 있다.

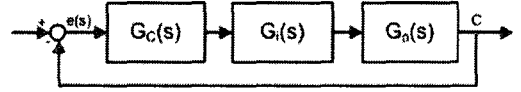


Fig. 5 Block diagram for stable magnetic bearing

$$\frac{C}{R} = \frac{G(s)}{1+G(s)}, \quad G(s) = G_c(s)G_p(s)G_s(s) \quad (8)$$

$$G_c(s) = \frac{K_p + K_p \tau_s s + K_d s}{1 + \tau_s s}, \quad \text{제어기 전달함수}$$

$$G_p(s) = \frac{K_{as}}{1 + \tau_c s}, \quad \text{증폭기 · 센서부 전달함수}$$

$(K_{as} = K_a K_s)$

$$G_s(s) = \frac{1}{ms^2 - K}, \quad \text{플랜트 전달함수}$$

$$F(s) = 1 + G(s)$$

$$= m\tau_s \tau_c s^4 + m(\tau_s + \tau_c)s^3 + (m - \tau_s \tau_c K)s^2 + (K_{as} K_p \tau_s + K_{as} K_d - (\tau_s + \tau_c)K)s + K_{as} K_p - K \quad (9)$$

Routh-Herwitz 안정도 판별법에서 특성방정식의 모든 근이 s 평면의 왼쪽 반평면에 있을 필요충분조건은 특성방정식의 모든 계수가 양수이면서, Routh-Herwitz 배열에서 제1열의 모든 항들이 양의 부호를 가지는 것이다. 따라서 다음과 같이 표현할 수 있다⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

$$F(s) = a_0 s^4 + a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_0 = 0 \quad (10)$$

$$a_0 = m\tau_s \tau_c$$

$$a_1 = m(\tau_s + \tau_c)$$

$$a_2 = (m - \tau_s \tau_c K)$$

$$a_3 = (K_{as} K_p \tau_s + K_{as} K_d - (\tau_s + \tau_c)K)$$

$$a_4 = K_{as} K_p - K$$

일 때,

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0, \quad (11)$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_1(a_2a_3 - a_1a_4) - a_0a_3^2 > 0, \quad (12)$$

$$a_4 > 0 \quad (13)$$

비례이득 K_p 와 미분이득 K_d 를 변수로 하고 (7)식을 이용한 보정식으로 구한 강성을 Routh- Herwitz 안정도 판별법에 도입하고 각 바이어스 전류에 따른 안정영역은 Fig. 6과 같다.

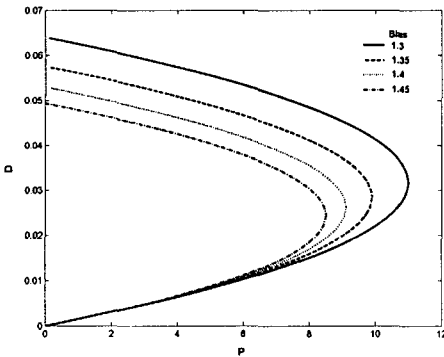


Fig. 6 Stable regions for Proportional and derivative gain

Fig. 6에서 바이어스 전류가 커짐에 따라 미분계인의 하한은 변하지 않고 미분계인과 비례계인의 상한이 일정하게 작아지므로 안정 영역이 줄어들게 된다.

4. 결론

본 논문에서는 전자기 이론을 통해 해석적으로 구한 강성과 실험적으로 측정된 강성을 비교하고, 강성의 증가에 따른 안정화 계인 영역의 변화를 고찰하였다.

이론적인 강성식에 보정 자극 면적을 적용한 결과, 실험적인 강성값에 상당히 근접함을 볼 수 있었다. 따라서 중요한 시스템 파라미터 중 하나인 강성에 보정식을 도입하여 제어기를 설계하는 것이 타당하다고 생각된다.

또한 강성이 증가함에 따라 제어 계인의 안정 영역이 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 높은 바이어스 전류에 의해 시스템의 안정성이 저하될 수 있음을 의미한다.

향후 고속 회전 주축의 자기 부상 시스템에 이번 결과를 적용하여 보고 고급제어기법을 통해서 그 성능향상에 대해 연구할 예정이다.

참고 문헌

- (1) Yong Jin Park, 1993, "PID Control of Active Magnetic Bearings", HangYang Univ, pp.1~2, pp.8~9.
- (2) Kyong-Il, Jong-Kweon Park and Jun-Hee Hong, "Controller Design of Magnetically Suspended Spindle Based on the Inductive Sensor Dynamics", KSME Spring Conference 7, pp. 140
- (3) T.A.Lipo, 1996, *Introduction to AC Machine Design*, WISCONSIN POWER ELECTRONICS RESEARCH CENTER UNIVERSITY OF WISCONSIN, pp. 40~42.
- (4) Katsuhiko Ogata, 2003, *Modern Control Engineering 4th*, Prentice Hall, pp. 275~277, pp. 314~320.
- (5) Laszlo E. Kollar, Gabor Stepen and Janos Turi, 2003, "Dynamics of delayed piecewise linear systems", Electronic Journal of Differential Equations, Mississippi Conference 10, pp. 168~169.