

광파이버 변위 센서를 적용한 자기베어링 정적 부상 제어 연구

강종규*, 신우철+, 홍준희**

A Study on the Static Levitation Control of Magnetic Bearing using Optical Fiber Displacement Sensors

Jong-Gyu Kang*, Woo-Cheol Shin+, Jun-Hee Hong **

Abstract

Five expensive sensors are necessary to control a magnetic bearing system. The sensor price rate of magnetic bearing system is high. So it is necessary that cheap and good sensor is developed. The optical fiber displacement sensor is adaptive to satisfy this condition. We can design magnetically suspended spindle based on static characteristic of optical fiber displacement sensor developed. The controller can be designed by decoupled feedback PD. Therefore, it is simpler than any other controller comparatively.

Key Words : Magnetic bearing(자기베어링), Optical fiber displacement sensor(광파이버 변위 센서)

1. 서론

자기베어링은 자기부상을 이용하여 목표물을 비접촉 지지하는 것으로 고속 회전이 가능하고 반영구적인 수명을 가지며 윤활이 필요하지 않아 청정성이 매우 높다. 이러한 이점으로 선진국에서는 이미 개발에 성공하여 산업부문에 적용이 이루어지고 있으며 국내에서는 이러한 장점을 지닌 자기베어링에 관한 연구가 최근 수년간에 걸쳐 진행되고 있다.

그러나 이러한 자기베어링의 안정적인 부상을 위해서는 하나 이상의 능동 시스템이 필요하며 따라서 자기베어링 시스템을 구성하기 위해서는 다수의 모니터링용 센서가 요구된다. 아울러 전체 코스트 중 센서가 차지하는 비중이 매우 높기 때문에 자기베어링에 적합하고 낮은 코스트의 센서 개발이 절실하다.

현재 자기베어링에 적용된 센서는 와전류 센서, 용량형 센서, 유도형 센서, 광파이버형 센서 등이 있다.

와전류 센서는 대역폭이 크고 가격이 비교적 저렴하지만

* 충남대학교 기계공학과 대학원(kkng809@hanmail.net)

주소: 305-764 대전시 유성구 공동 220번지

+ 충남대 기계공학과 대학원

++ 충남대 기계공학과

자기장에 매우 민감하고 분해능이 낮은 편이며 고주파의 가진회로를 사용하므로 자계의 영향을 받기 쉬운 단점이 있다. 용량형 센서는 구조가 간단하고 분해능이 우수하나 대역폭이 낮고 와전류 센서에 비해 가격이 비싼 편이다. 유도형 센서는 측정 범위가 넓고 경제성이 좋은 장점을 가지고 있으나 외부 자장의 영향을 받기 때문에 자기베어링과의 근접이 제한되고 자장 차폐를 고려해야 한다. 마지막으로 광파이버 형태의 센서는 비교적 구조가 간단하고 측정 속도가 빠르며 전자파의 영향이 없어 변위 측정에 널리 이용되고 있다.

본 논문은 지면에 접하지 된 축을 하나의 레이디얼 자기베어링으로 직립을 유지하는 역진자 모델을 구성하여 부상 실험을 하였다. 또한 축 중심으로부터의 기울어진 변위를 측정하기 위해 개발 중인 광파이버 변위 센서(1)를 적용하여 그 특성을 고찰하였다.

2. 광파이버 변위 센서

2.1 센서의 구성

광파이버 변위 센서는 발광부, 수광부, 측정부, 신호검출 회로부의 크게 4부분으로 구성된다. Fig.1과 같이 발광부는 광원인 레이저다이오드(LD)와 LD드라이버로 이루어져 있고 전달체인 파이버로 빛을 공급한다. 측정부에서는 발광파이버로부터 나온 빛이 타겟에 조사되고 그 반사광이 수광파이버에 입사됨으로써 목표물의 변위에 대한 정보를 얻게 된다. 수광부는 수광파이버에 의해 전달된 빛이 포토다이오드(PD)에 조사되며 그 광량의 변화에 따라 전류 신호를 발생하게 된다. 신호검출회로는 포토다이오드에서 나오는 전류 신호를 전압신호로 변환함과 동시에 전기적인 노이즈를 제거하여 제어기에 변위에 대한 전압신호를 공급하게 된다.

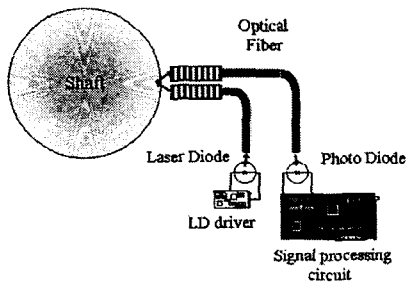


Fig. 1 Schematic of an optical fiber sensor

2.2 측정 원리

광파이버 변위 센서는 발광파이버를 통해 나온 빛이 반사면에 조사된 뒤 수광파이버에 입사되는 반사광량의 변화 관례로부터 타겟의 변위에 관한 정보를 얻는다.

Fig. 2에서와 같이 발광파이버에서 나오는 빛은 파이버 내에서의 반복 반사와 파이버 재질과 공기 사이의 굴절률, 광 회절로 인해 퍼짐각(α°)을 가지고 타겟에 조사된다. 따라서 반사광 조도는 일정한 값(I_0)을 갖는 영역과 선형적으로 감소하는 영역으로 구분된다.

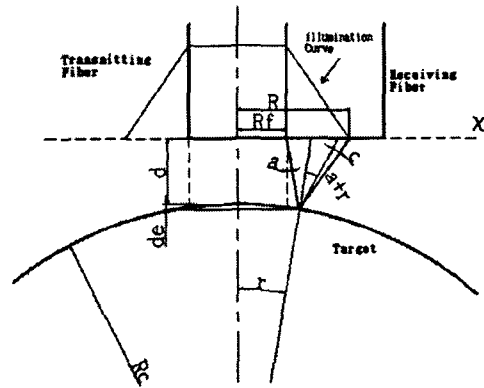


Fig. 2 Illumination curve of reflected light

그러면, 반사광속을 나타내는 다음의 두 식 (1), (2)를 통해서 반사광 조도(I_0)에 관한 식(3)을 유도할 수 있다.

$$\Phi_0 = \rho \pi R_f^2 E_0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= 2\pi I_0 \left\{ \int_0^{R_f} x dx + \int_{R_f}^R \frac{1}{R-R_f} (R-x) x dx \right\} \\ &= \frac{\pi}{3} I_0 (R^2 + R R_f + R_f^2) \quad (2) \end{aligned}$$

$$I_0 = \frac{3\rho R_f^2}{R^2 + R R_f + R_f^2} E_0 \quad (3)$$

여기서, ρ 는 타겟의 반사율, R_f 는 단일 파이버 직경, E_0 는 입사광 조도를 나타낸다. R 은 파이버 끝단면 상에서 반사광이 조사되는 부분의 반경으로서 다음 식으로 구할

수 있다.

$$R = R_f + [d_e + d][\tan(\alpha) + \tan(\alpha + 2r + c)] \quad (4)$$

여기서 타겟이 원형이므로

$$d_e = R_c [1 - \cos(r)] \quad (5)$$

와 같다.

여기서, r 은 측정면 곡률에 의해 나타나는 경사각을 의미하고, 식(4)에서 각도 c 는 표면 경사각 분포로 결정되는 한계 반사각으로서 표면 경사각은 타겟의 표면 거칠기에 의해 결정되며 표면 거칠기와 한계 반사각의 관계를 Table. 1에 나타내었다.

Table. 1 Surface roughness vs. limited angle of reflection^{(2), (3)}

Material	Rmax	C
low-carbon steel	1 ~ 15 μ m	5° ~ 21°
brass	0.5 ~ 1.0 μ m	4° ~ 5°
	2.0 ~ 3.0 μ m	8° ~ 9°

따라서, 식(4)에 의해 공극 d 의 변화에 따른 R 의 변화로 수광파이버내로 들어가는 광량을 변화시켜 전기신호를 얻어낸다.

2.3 성능 및 특성

자기베어링 시스템에서 센서의 성능은 크게 두 가지를 필요로 한다. 하나는 감도로서 변위에 대한 출력전압의 비를 나타내고 다른 하나는 분해능으로서 감도에 대한 노이즈 크기의 비를 의미한다. 특히 감도는 제어시스템에서 센서 계인으로 사용되는 중요한 파라미터이므로 본 논문에 적용한 광파이버 변위 센서의 감도를 보정실험을 통해 구하였으며 또한 자기장이 센서의 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. Fig. 3은 광파이버 변위센서의 보정데이터를 최소자승법으로 선형화한 것이며 민감도는 9944[V/m]이다.

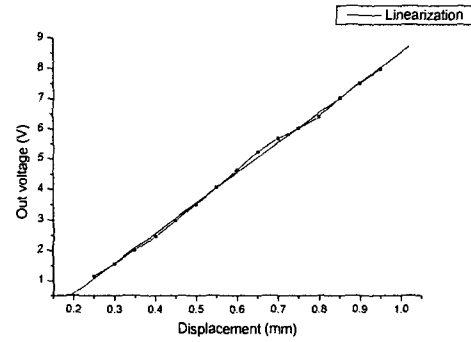


Fig. 3 Sensitivity of a optical fiber displacement sensor

자기베어링 시스템에서는 센서의 위치 또한 설계에 있어서 중요한 고려사항이다. 보통 자기베어링 시스템에 가장 널리 사용되고 있는 와전류 센서의 경우 자기장의 영향으로 베어링과의 근접이 제한된다. 따라서 광파이버 변위 센서 또한 자기장에 대한 감도의 변화를 고찰해 볼 필요가 있다. Table. 2는 자기베어링에 광파이버 변위 센서를 1cm로 근접시킨 후 자기베어링에 공급되는 전류에 따른 센서감도의 변화를 나타낸다. 실험결과 자기장이 커질수록 감도는 떨어지는 경향을 보이거나 그 영향은 무시할만한 수준임을 확인할 수 있었다.

Table. 2 Variation of sensor sensitivity for magnetic bearing driving current

Current	Sensitivity
1 A	9977 V/m
1.5 A	9939 V/m
2 A	9913 V/m

3. 자기 부상 시스템 모델

3.1 자기장 해석

본 논문의 실험은 제어가 용이하고 가장 널리 사용되고 있는 8-pole 레이디얼 자기베어링을 사용하였다. Fig. 4의 개략도에서 전자석에 의한 x 방향의 힘 F_x 는 다음과 같다.

$$F_x = F_{x1} - F_{x2} = \frac{\mu_0 A N^2 (I_{M1} + i_c)^2}{(g_0 - x \cos \theta)^2} \cos \theta$$

$$-\frac{\mu_0 A N^2 (I_{b2} - i_c)^2}{(g_0 + x \cos \theta)^2} \cos \theta \quad (6)$$

여기서, μ_0 는 자유공간 투자율, A 는 베어링 pole의 단면적, N 은 코일의 감은수, I_{b1} , I_{b2} 는 바이어스 전류, g_0 는 정상상태 공극이다.

$$I_b = I_{b1} = I_{b2}$$

라 하고, 식 (6)을 Taylor급수 전개법에 의해 선형화하면

$$F_x = K_x x + K_i i \quad (7)$$

여기서,

$$K_x = \frac{4 \mu_0 A N^2 I_b^2}{g_0^3} \cos^2 \theta \quad (8)$$

$$K_i = \frac{4 \mu_0 A N^2 I_b}{g_0^2} \cos \theta \quad (9)$$

식(8)은 위치강성(position stiffness), 식(9)는 전류강성(current stiffness)을 나타낸다.

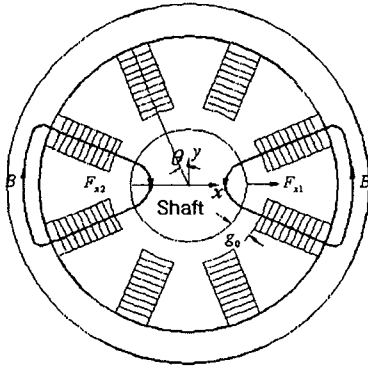


Fig. 4 Schematic of a radial magnetic bearing

3.2 동역학적 모델링

본 실험의 역진자 모델은 Fig. 5의 자유물체도를 가지며 F_x 는 자기베어링에 의해 발생되는 힘으로 식 (7)과 같다.

θ 가 아주 작다고 가정하고, $\sin \theta \approx 0$, $\cos \theta \approx 1$ 의 관계를 이용하면 다음의 운동방정식을 얻는다.

$$\frac{m}{6} \ddot{x} - \frac{mg}{2l} x = K_x x + K_i i \quad (10)$$

식 (8), (9)를 대입하면,

$$\begin{aligned} \frac{m}{6} \ddot{x} - \left[\frac{mg}{2l} + \frac{4 \mu_0 A N^2 I_b^2}{g_0^3} \cos^2 \theta \right] x \\ = \frac{4 \mu_0 A N^2 I_b}{g_0^2} \cos \theta i_x \end{aligned} \quad (11)$$

같은 방법으로 y 방향은

$$\begin{aligned} \frac{m}{6} \ddot{y} - \left[\frac{mg}{2l} + \frac{4 \mu_0 A N^2 I_b^2}{g_0^3} \cos^2 \theta \right] y \\ = \frac{4 \mu_0 A N^2 I_b}{g_0^2} \cos \theta i_y \end{aligned} \quad (12)$$

식 (11)과 (12)에서 알 수 있듯이 역진자 모델은 2개의 단일입출력시스템으로 구성되어 있어 각 방향에 대해 독립적인 제어가 가능하게 된다.

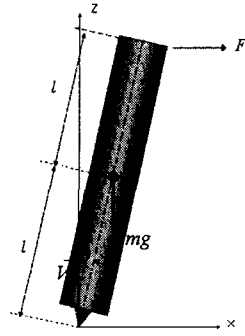


Fig. 5 Free-body diagram of a inverted pendulum

3.3 제어기 설계

제어 알고리즘 구현이 용이하고 가장 널리 사용되고 있는 PID제어이론⁽⁴⁾을 적용하면 적분제어의 경우 초기 부상응답시 자칫 시스템을 불안정하게 만들 수 있는 요인이 된다. 따라서 본 논문에서는 이를 배제하고 Fig. 6에서와 같이 PD제어만으로 제어를 설계하였다.

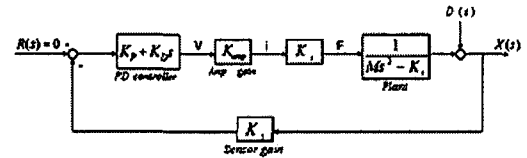


Fig.6 Block diagram of the inverted pendulum

$$\frac{X(s)}{D(s)} = \frac{M s^2 - K_x}{M s^2 + K_i K_{amp} K_s K_d s + K_i K_{amp} K_s K_p - K_x}$$

초기 부상응답은 Fig. 5의 블록선도에서와 같이 외란 $D(s)$ 를 추가함으로써 모델링할 수 있다. $D(s)$ 를 크기 0.5×10^{-3} 인 스텝입력으로 하고 정상상태 오차를 0.05×10^{-3} 이하, 감쇠비 ζ 를 0.707로 하는 시스템 조건을 선정하면 다음과 같은 비례계인과 미분계인을 얻을 수 있다.

$$K_p \geq 0.737 \quad (14)$$

$$K_d \geq 0.0024 \quad (15)$$

4. 실험 장치 및 결과

4.1 실험 장치 및 시스템 사양

본 논문의 실험에 사용된 실험장치의 개략도와 시스템 파라미터의 사양은 각각 Fig. 7, Table 3과 같다.

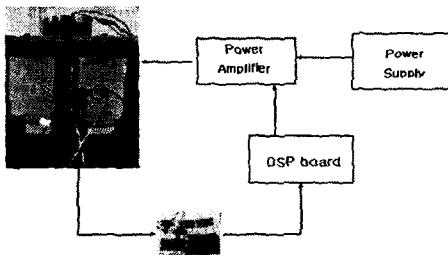


Fig.7 Schematic of the experiment device

Table. 3 Specification of the system

Parameter	Value
shaft mass [kg]	7.14
air gap [mm]	0.7
area of pole [m ²]	5.6×10^{-4}
number of turns [times]	130
K_x [N/m]	18907
K_i [N/A]	35.8
amp gain [A/V]	2
sensor gain [V/m]	9944

4.2 결과

우선, 상용화되어 자기베어링 시스템에 가장 널리 적용되고 있는 와전류 센서를 광파이버 변위 센서와 동시에 모니터링하여 신뢰성을 고찰하였다. Fig. 8은 개발 중에 있는 광파이버 변위센서와 상용 와전류 변위센서의 신호를 각각 변위로 환산하여 그래프화한 것으로 두 신호가 거의 일치함을 볼 수 있다. 따라서 광파이버 변위센서의 신뢰성이 만족됨을 확인할 수 있다.

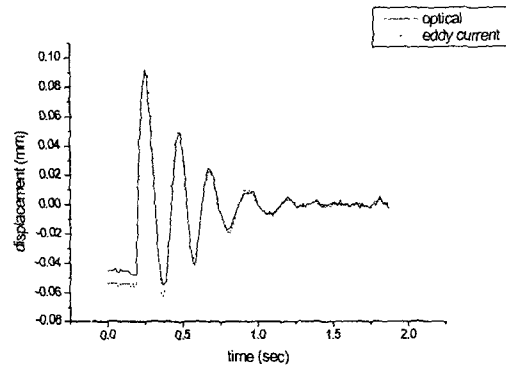


Fig. 8 Output signals of optical fiber displacement sensor and eddy current sensor

다음으로 광파이버 변위센서를 적용하여 자기베어링의 정적 부상실험을 하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 제어기 파라미터인 K_p 와 K_d 를 반복 튜닝하여 실험적으로 구해진 부상응답곡선을 나타낸다. K_p 에 따른 응답특성을 고찰하기 위하여 이론적으로 구한 K_d 는 0.0024로 고정하고 K_p 의 이론값인 0.74와 그 위아래 값인 0.64와 0.84에 대한 응답특성을 고찰하였다. 실험 결과 Fig. 9에서와 같이 이론적으로 구한 $K_p = 0.74$ 일 때 정상 응답이 가장 좋았다. K_d 에 따른 응답특성을 고찰하기 위하여 이론적으로 구한 K_p 는 0.74로 고정하고 K_d 값을 이론적으로 구한 0.0024에서 0.0064까지 0.002씩 증가 시켜 응답특성을 고찰하였다. 실험 결과 Fig. 10에서와 같이 미분계안을 증가시킬 경우 대체로 안정적인 시스템이 구현되었다. 특히 미분계인이 0.0064인 경우 설계 사양이었던 정상상태 오차 범위 0.05×10^{-3} 에 수렴하였으며 정착시간은 0.78s의 빠른 응답 속도로 가장 좋은 결과를 보여주고 있다.

5. 결론

자기베어링 시스템의 정적 부상실험에 개발 중에 있는 광파이버 변위센서를 적용하여 그 성능을 고찰하였다. 우선 광파이버 변위센서의 자기장에 대한 영향 여부를 실험한 결과 센서의 정적 특성에는 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있었다. 또 상용화된 캡센서와 광파이버 센서를 이용해 부상실험을 한 결과 동일한 특성이 나타남을 볼 수 있었다. 따라서 광파이버 변위센서를 자기베어링 시스템의 정적 제어에 적용 시 신뢰성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

향후 고속 회전 주축의 자기 부상 시스템에 광파이버 변위센서를 적용하여 그 성능을 고찰할 예정이다.

참고 문헌

- (1) Woocheol Shin, Changyu Park, Tackgu Jung, Junhee Hong, Dongju Lee "An Experimental Study on the Runout Characteristics of Spindle State Monitoring Using an Optical Fiber Displacement Sensor" KSMTE Spring conference 2003, pp.472~477
- (2) Katsumuasa Saito and Takashi Miyoshi, 1974, "Principles of the fiber Optics Glossmeter - Study on the Gloss Measurement of polished metal Surface by means of Fiber Optics (1st Report)-" pp.129~134
- (3) Takashi Miyoshi and Katsumuasa Saito,1981,"Analysis of Concentric Distribution Optical Fiber Bundle - Development of a Sensor for Gloss Measurement of Polished Metal Surface by means of Fiber Optics (1st Report)-" pp.338~343
- (4) Katsuhiko Ogata, 1997, Modern Control engineering, PRENTICE HALL, pp. 404~470

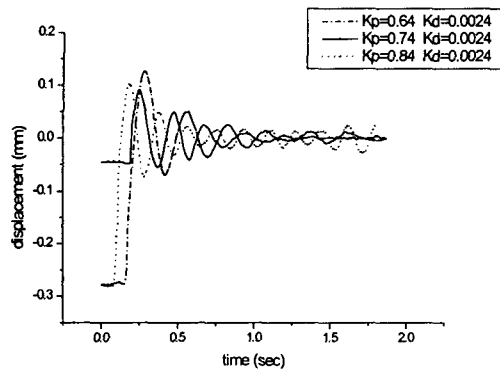


Fig. 9 Response curves by K_p

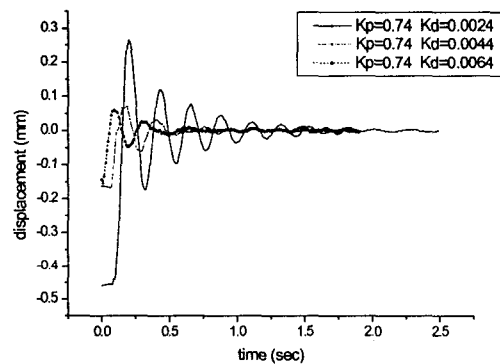


Fig. 10 Response curves by K_d