

자기 베어링 주축시스템의 유도형 센서 개발

신우철*, 이동주*, 홍준희*, 노명규**
(충남대학교 기계공학과*, 충남대학교 메카트로닉스 공학과**)

Development of Inductive Sensor in Magnetic Bearing Spindle System

Woocheol Shin , Dongju Lee , Junhee Hong , Myounggyu Noh

ABSTRACT

In a high speed spindle system, it is very important to monitor the operation of the spindle to prevent catastrophic damage to the system. Widely used sensors for monitoring are eddy-current and capacitive types. These sensors provide high accuracy of monitoring, but their steep prices lead to expensive high speed spindle system. The main goal of our research is to develop technology to produce high speed spindle system utilizing magnetic bearings. As active magnetic bearings require position sensors for feedback control, a noncontact position sensor is being developed as a part of this main goal. Once developed, it will contribute to affordable high speed spindle system. In this paper, we report the selection process of the sensor types and the experimental results with driving circuits.

Key Words : Gap monitoring (상태모니터링), nose (노이즈), High speed spindle system(고속 회전 주축계), Eddy-current sensor(와전류 센서), Capacitive sensor(용량형 센서)

기호설명

L ; 인덕턴스
 N ; 코일 감은 수
 i ; 전류
 μ_0 ; 진공에서의 비투자율
 ϵ_0 ; 공극
 A ; 자심의 단면적
 y ; 이상적인 압전소자의 변위
 x ; 주축의 변위량
 L_0 ; 주축의 중심 위치에서 인덕턴스

R ; 회로저항
 ω_e ; 가진 주파수
 I_0 ; 입력전류
 V_0^+ ; 위쪽 자석(센서)의 전압
 V_0^- ; 아래쪽 자석(센서)의 전압
 v_0 ; 입력전압
 v_1 ; 출력전압
 r_1, r_2 ; 등가저항
 V_{sup} ; 공급 전압

1. 서론

주축계의 고속화 및 고정밀화를 추구하는 최근 기술 동향에 발맞추어 주축을 지지하는 베어링 기술은 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 자기 베어링은 자기 부상 원리에 의한 비접촉 지지를 구현함으로써 주축의 고속회전을 가능하게 할 뿐 아니라 능동적 제어시스템을 통해 진동을 억제하여 높은 정도로 주축 회전을 가능하게 한다. 이러한 자기 베어링의 능동적 제어를 위해서 주축의 상태 모니터링이 중요하다. 현재 자기 베어링 상태 모니터링에 사용되고 있는 센서로는 와전류형 센서(Eddy-Current Sensor)와 용량형 센서(Capacitive Sensor)가 가장 일반적이며 그 외에 광 센서(Fiber Optic Sensor)와 본 논문에서 다루게 될 유도형 센서(Inductive Sensor) 등이 있다.

유도형 센서가 다른 센서와 비교할 때 우수한 점은 선형성이 좋고, 히스테리오차가 적으며 구조가 간단하고, 센서 프루브가 적층구조(Lamination)

로 되어 있어 자기장에 의한 와전류 손실을 줄일 수 있다는 점이다. 본 논문은 1차적으로 유도형 센서 프루브(Probe) 설계 및 제작과 기본적인 신호 처리 회로를 구성하여, 이 회로를 이용한 기초 실험을 통하여 센서로서 갖추어야 할 정적 특성을 고찰하는데 중점을 두었다. 또한 동적 특성인 주파수 응답성에 대해서는 계속적이 연구 개발이 요구된다.

2. 유도형 센서의 설계

2.1 유도형 센서 이론적 해석

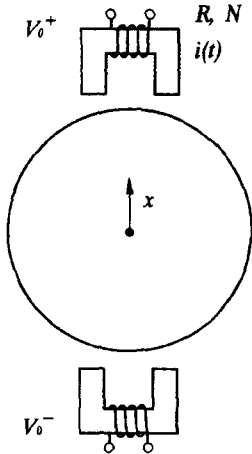


Fig.1 Principle of Inductive Sensor

2.1.1 변위(x)에 따른 인덕턴스(L)변화

$$L = \frac{N\Phi}{i} = \frac{\mu_0 AN^2}{2(g_0 - x)}$$

이 때 인덕턴스를 선형 테일러 급수식을 이용하여 다음과 같이 선형화할 수 있다.

$$L(x) = L_0 + K_L x \quad (2)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0 AN^2}{2g_0}, \quad K_L = \frac{\mu_0 AN^2}{2g_0^2} \quad (3)$$

2.1.2 인덕턴스에 따른 센서의 출력 신호 전압

가진 전류의 주파수가 변위의 변화 주파수보다 매우 크다면($\omega_e \gg \omega$) 위쪽과 아래쪽의 자석에서 전압을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

위쪽 자석

$$V_0^+ = I_0 R + j\omega_e (L_0 + K_L x) I_0 \quad (4)$$

아래쪽 자석

$$V_0^- = I_0 R + j\omega_e (L_0 - K_L x) I_0 \quad (5)$$

$$i = I_0 e^{j\omega_e t}, \quad v = V_0 e^{j\omega_e t} \quad (6)$$

두 전압차는 다음과 같이 변위의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_0(t) = V_0^+ - V_0^- = j\omega_e 2K_L I_0 x(t) \quad (7)$$

위 식을 파형으로 나타내면

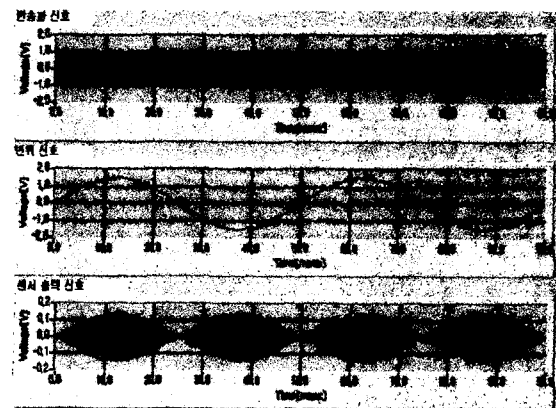


Fig.2 Waveform of Component Signal

앞의 식 (7)에서 절대값만의 비를 보면

$$|\Delta V_0| = \omega_e |x| I_0 \frac{\nu_0 AN^2}{g_0^2} \quad (8)$$

여기서

$$I_0 = \frac{V_{sup}}{R_{coil}} \quad (9)$$

이므로 이러한 관계에서 면적과 감은 수, 가진 주파수, 전압폭, 공극 등을 이용하여 원하는 센서의 제원을 결정할 수 있다.

2.2 센서 기본 구성 회로 및 변위신호 검출 회로 설계 및 제작

2.2.1 센서 기본 구성 회로

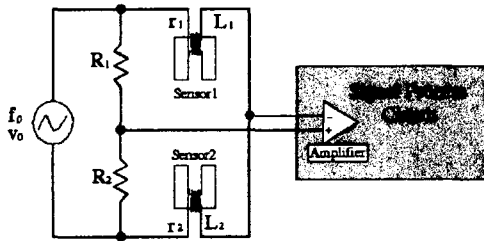


Fig. 3 Basic Structure of Inductive Sensor

진폭의 값의 부호가 바뀌는 것을 방지하기 위해 센서의 위 아래 코일 사이에 외부 저항 R_1 과 R_2 를 추가한다. 이 때의 출력 전압 신호는 다음 식과 같이 된다.

$$v_1 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{r_2 + j\omega_0 L_2}{r_1 + j\omega_0 L_1 + r_2 + j\omega_0 L_2} \right) v_0 \quad (10)$$

$$L_1 = \frac{\mu_0 AN^2}{l_{probe}/\mu_{r_{probe}} + l_{target}/\mu_{r_{target}} + 2(x_0 - x)}$$

$$L_2 = \frac{\mu_0 AN^2}{l_{probe}/\mu_{r_{probe}} + l_{target}/\mu_{r_{target}} + 2(x_0 + x)}$$

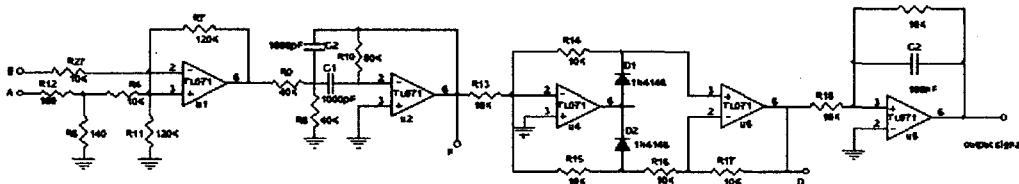


Fig. 4 Test Circuit of Signal Detection System

철심과 센서 대상체(target)에서의 상대 투자율이 충분히 크다고 할 때

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \frac{x_0}{(x_0 - x)} L_0 \\ L_2 &= \frac{x_0}{(x_0 + x)} L_0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0 AN^2}{2x_0}$$

와 같이 나타낼 수 있다.

여기서 외부 저항 R_1 과 R_2 는 센서의 출력 신호의 진폭값의 부호가 바뀌지 않도록 하는 offset 와 같은 값으로 선정하며 상대적으로 큰 저항치를 연결한다.

2.2.2 변위 신호 검출 회로

변위 신호 검출 회로를 크게 4부분으로 나뉜다.

신호 증폭 회로부는 센서로부터 입력 받은 신호를 증폭하는 기능을 하고, Band Pass 필터 회로부는 중심 주파수를 센서 입력 주파수와 같게 맞추어 신호 주파수 이외의 신호(노이즈)를 차단하는 기능을 한다. 전파 정류 회로부는 정현파 신호의 음의 값을 반전시키는 기능을 하며, Low Pass 필터 회로부는 직류에 가까운 리플 파형을 만드는 기능을 한다.

2.3 유도형 센서 프루브 제작

유도형 센서의 프로브는 전자석과 마찬가지로 코일과 철심으로 이루어진다. 그러나 여기서 중요한 것은 유도형 센서에는 가진 신호가 10kHz 이상의 고주파이므로 상대 투자율이 큰 재료와 얇은 적층판으로 되어 있는 재료가 절대적으로 필요하다. 이는 고주파의 교번 자속이 생기는 경우에 와전류 및 히스테리시스 효과에 의해 자속 밀도의 손실이 발생하며 실제 자기력의 크기가 작아지게 되는 문제점이 있다.

본 실험에 사용한 센서 프로브의 사양은 그림 6과 같다. 프로브는 0.1mm 두께의 규소 강판을 적층한 것으로 규소 강판은 Magnetic Metal사의 Lamination Type 124DU를 사용하였다.

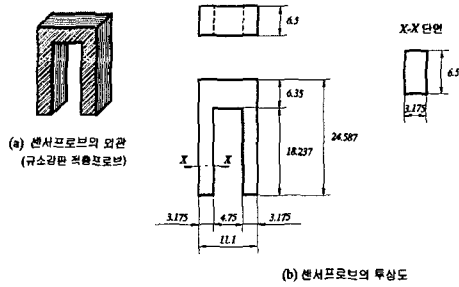


Fig. 5 Specimen of Sensor Probe

3. 실험 장치

3.1 정적 특성 실험

마주보는 한 쌍의 유도형 센서 중앙에 타겟을 위치하고 타겟과 각각의 센서와의 공극을 0.25mm로 한다. 이 때 대상체(Target)은 Positioning Stage위에 설치되어 있고, 이 Positioning Stage는 마이크로미터의 변위량으로 위치 결정이 가능하다. 따라서 마이크로미터의 변위량과 센서 출력 신호에 의한 변위값을 비교함으로써 정적 특성 실험을 수행하였다. 이 때 유도형 센서에 의해 측정되는 대상체(Target)의 측정 부위 또한 규소 강판의 적층구조(lamination) 구조로 함으로써 와

전류 손실을 최소화 하였다.

센서회로의 작동 성능 확인을 위한 센서 입력 신호는 다음과 같다.

$$v_0 = 5 \text{ V}, f_0 = 20 \text{ kHz}$$

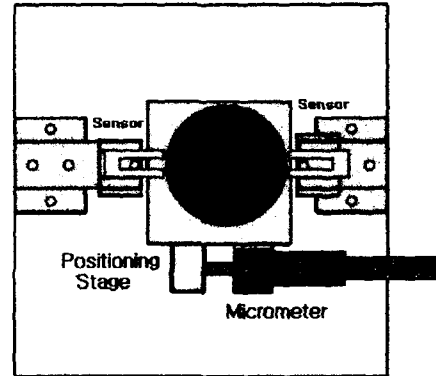


Fig. 6 Sensing Test Device

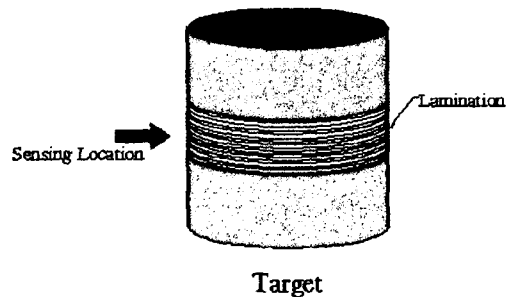


Fig. 7 Target

3.2 동적 특성 실험

타겟을 지지하고 있는 Positioning Stage를 가진 기(Exciter)와 연결하여 대상체(Target)에 진동을 가한다. 가진기의 입력 주파수를 조정하여 센서의 주파수 응답성을 실험하였다. 이때 센서로부터 출력되는 신호는 FFT를 통해 주파수 응답 결과를 얻었다.

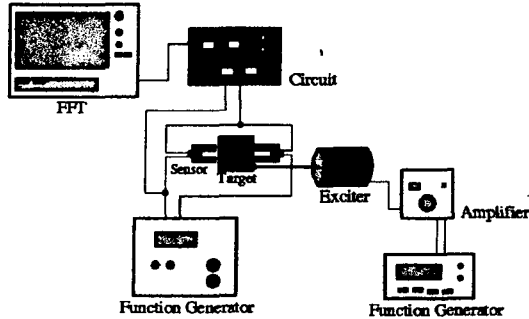


Fig. 8 Dynamic Test System

4. 결과 및 고찰

4.1 유도형 센서의 정적 특성

4.2.1 선형성

Fig. 10은 실제 실험하여 얻은 출력 전압 데이터를 나타낸 것이다. 상당히 훌륭한 선형성을 보이고 있다. 실험 데이터를 Linear Regression 하면,

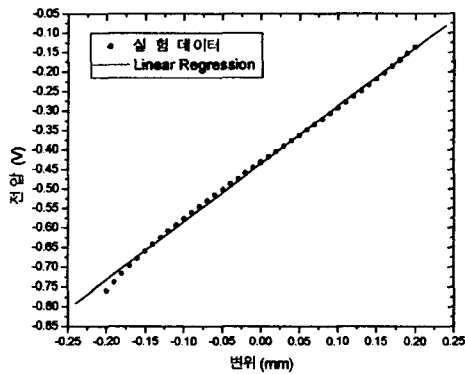


Fig. 9 Linearity

$$Y_i = A + BX_i$$

X : 독립변수 (변위)

Y : 종속변수 (전압)

A와 B는 최소자승법에 의해,

$$A = -0.43642$$

$$B = 1.48031$$

선형성 계산 결과는 다음과 같다.

$$R(\text{Correlation coefficient}) = 0.99909$$

$$SD(\text{Standard deviation}) = 0.00734$$

$$\text{최대 편차} = 4.417 \% \text{FSO}$$

4.2.2 히스테리시스 오차

입력을 증가시켰을 때와 감소시켰을 때의 센서 출력값의 차이를 비교한 결과 거의 히스테리시스 오차가 없는 것으로 판명되었다. 최대 히스테리시스 오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{hysteresis} &= \frac{0.002V}{(0.76 - 0.137)V} \times 100 \\ &= 0.321\% \text{FSO} \end{aligned}$$

4.2.3 반복성

0.02mm 단위로 4 cycle 반복 실험 결과이다.

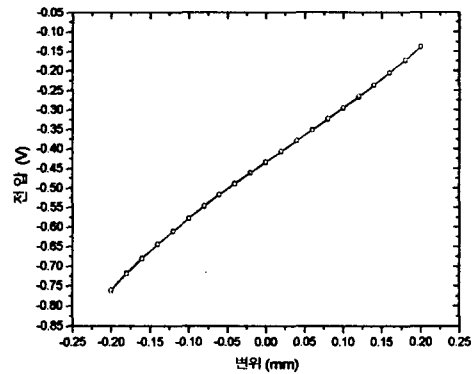


Fig. 10 Repeatability

4.2 유도형 센서의 동적 특성

다음은 유도형 센서 주파수 응답성 실험 결과이다.

참고문헌

1. S. Moriyama et al, "Inductive Sensing System for Aactive Suspension Control," SENSOR/SELF-SENSING, p.529-537, 1988.
2. K. Mohri, "Magnetic Sensor," CORONA PUB. CO., 1998.
3. M. A. Rozenblat, " Magnetic Sensor : State of the Art and Trends "

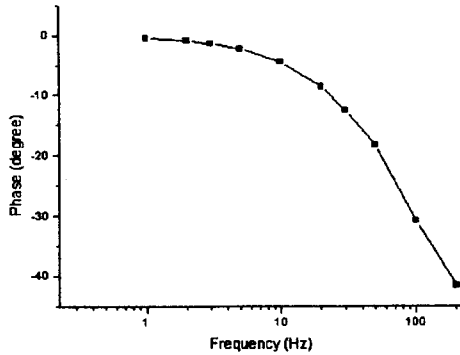


Fig. 11 Frequency Response (Phase)

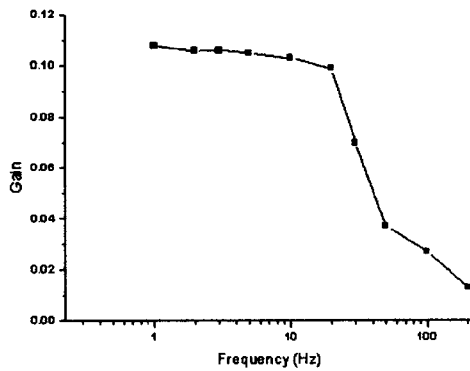


Fig. 12 Frequency Response (Gain)

5. 결론

자기 베어링 시스템 개발에 필요한 센서 제작을 목적으로 본 연구는 유도형 센서 제작과 신호 검출 회로를 구성하여 유도형 센서의 정적특성 및 동적특성을 고찰하였다. 선형성과 히스테리시스 특성, 반복성의 정적 특성은 매우 양호하게 나왔으나, 동적특성 면에서는 많은 연구와 개발이 필요하다. 특히 동적특성을 높이기 위해 신호 처리 회로에 대한 개발이 이루어져야 한다. 또한 센서의 민감도를 떨어뜨리는 와전류 손실에 대한 대책이 필요하다. 앞으로 지속적인 연구를 통해 센서특성을 개선시켜 자기 베어링에 적용할 수 있도록 하겠다.