

자기 부상 고속 주축계의 센서 개발

신우철* , 이동주** , 홍준희** , 노명규***

Development of Sensor for Magnetically Levitated High Speed 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 systems. The main goal of our research is to develop technology for producing 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. This paper describes the selection process of the sensor types and the design of the driving circuit. We also report the experimental results that characterize the static and dynamic performances of the inductive sensor.

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

기호설명

L ; 인덕턴스
 N ; 코일 감은 수
 i ; 전류
 μ_0 ; 진공에서의 비투자율
 g_0 ; 감은 코일의 높이
 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 자석의 전압
 V_0^- ; 아래쪽 자석의 전압
 v_0 ; 입력전압

v_1 ; 출력전압
 r_1, r_2 ; 등가저항
 V_{sup} ; 공급 전압

1. 서론

고속의 자기 베어링 회전축계에서는 회전 정밀도가 상당히 중요한 문제로 대두된다. 따라서 이에 대한 철저한 상태모니터링이 필요하며 이러한 상태 모니터링에 사용되는 센서에는 와전류형 센서(Eddy-Current Sensor)와 용량형 센서(Capacitive Sensor)가 가장 일반적이며 그 외에 광 센서(Fiber Optic Sensor)와 유도형 센서(Inductive Sensor) 등이 있다. 일반적으로 많이 사용하는 와전류 센서는

* 충남대학교 기계공학과 대학원; ** 충남대학교 기계공학과;

*** 충남대학교 메카트로닉스공학과

대역폭이 크고 가격이 비교적 저렴하지만 자기장에 매우 민감하고 분해능이 낮은 편이며 노이즈에 약하다. 또한 고주파(20~50kHz)의 가진 회로를 사용하므로 자계의 영향을 받기 쉬운 단점이 있다. 특히 인덕션 모터를 사용할 때는 모터 실딩(shielding) 문제를 신중히 고려하여야 한다. 자기 베어링 회전축계에서 회전 정밀도를 저하시키는 모터 로터에서 나오는 전류가 와전류 센서에 영향을 미치기 때문이며 이를 개선하기 위해서는 고투자율 재료를 회전로터 근방에 설치해 보는 방법과 센서 타겟을 연삭가공시 재질적으로 상변화에 둔감한 Cu 재질을 씌우는 방법을 제안해 볼 수 있다.

용량형 센서는 측정 대상체의 진동면이 전기 도체일 경우에 이를 축전판의 한 쪽으로 이용하고 진동에 따른 정전 용량의 변화량을 전압으로 변환시키는 역할을 한다. 비교적 복잡한 전기회로로 구성되지만 기계적으로 간단한 구조로 되어 있기 때문에 널리 이용된다. 분해능이 우수하며 대상체와의 접촉 문제가 있을 수 있으며 대역폭이 낮은 편이다. 또한 와전류 센서에 비해 가격이 비싼 편이다.

광 센서를 이용하면 전자기의 노이즈 영향은 고려할 필요가 없으며 분해능이 우수한 장점을 가지고 있다. 그러나 광 센서의 경우는 선형성이 낮고 타겟의 표면 상태(run-out)에 매우 민감하므로 초정밀 가공이 필요하며 반사 영향을 받기 때문에 이러한 반사 영향을 제거하기 위해 흑착색을 입히는 등 방안도 강구하여야 한다.

위의 3가지 타입은 상품화되어 있다. 그러나 자기 주축베어링의 상태모니터링에 사용되는 센서가 모두 5개 있는데 센서 한 개의 가격이 상당히 비싸서 자기 주축베어링에서 센서가 차지하는 비용의 비율이 상당히 커지므로 자기 주축 베어링을 국산화하는데 큰 장애요인이 된다.

따라서 본 연구에서는 위의 센서에서 문제시되는 점들을 최대한 줄이고 컴팩트하게 주축 베어링을 구성할 수 있는 유도형 센서를 개발하는 데 큰 목적을 두었다.

이 유도형 센서의 재료는 철에 규소를 소

량 첨가한 규소 강판을 사용하고 있다. 이 규소 강판은 고유저항을 증가시키고 와전류 손실을 작게 하는 한편 재료의 투자율을 높이고 보자력을 저하시키며 히스테리시스 손실도 작게 하는 특성을 가지고 있어서 본 연구에 가장 적절한 센서용 자석재료로 사료된다.

본 연구에서는 유도형 센서의 기본 회로설계 및 구성과 이 회로를 이용하여 기초 실험을 하여 센서로서 갖추어야 할 정적 특성과 동적 특성을 고찰하였다.

2. 유도형 센서의 설계

2.1 유도형 센서 설계 이론

Fig. 1과 같이 상하 방향의 전자석에 대해 인덕턴스는 다음과 같다.

$$L = \frac{N\Phi}{i} = \frac{\mu_0 AN^2}{2(g_0 - x)} \quad (1)$$

이 때 인덕턴스를 다음과 같이 선형화할 수 있다.

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

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

이 때 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

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

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

따라서 두 전압의 차이는

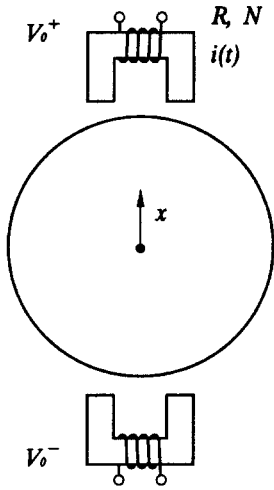


Fig. 1 Principle of inductive sensor.

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

와 같이 변위의 함수로 나타낼 수 있다.

Fig. 2는 가진 주파수(고주파수)와 변위 센싱 신호(저주파수)를 합성한 것으로 센서가 검출하는 신호의 파형을 나타낸다. 이는 우리가 흔히 알고 있는 진폭 변조(amplitude modulation)와 같은 과정으로 신호를 복조(demodulation)함으로써 원하는 변위 신호를

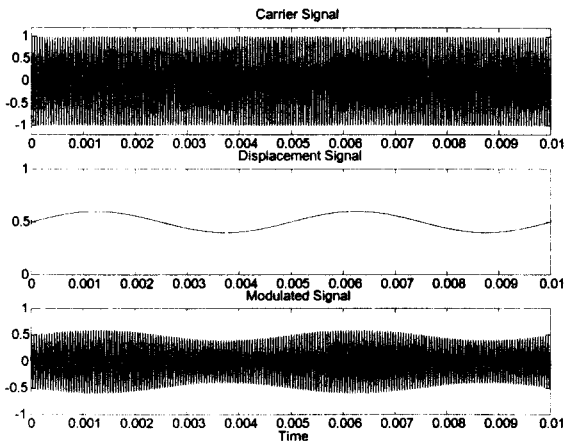


Fig. 2 Modulation Process

얻을 수 있다.

2.2 유도형 센서의 설계 기본개념

앞의 식 (7)에서 절대값만의 비를 보면

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

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. 여기서도 역시 자기 베어링의 경우와 같이 적층판을 사용하는데 와전류의 영향을 최대한으로 줄이기 위하여 얇은 규소 강판을 사용하여야 한다.

2.3 변위신호 검출회로 설계 및 제작

앞 절의 이론을 실제 적용하기 위해서는 전압의 진폭 변화를 변위신호로 바꾸어 주는 회로가 필요하다. 본 연구에서는 동기 검출회로(Synchronous detection circuit)를 이용하여 회로를 설계하였다. 동기 검출회로의 검출 알고리즘은 Fig. 3과 같다.

동기 검출회로는 전압 변동의 피크값을 동기시켜 검출하는 것으로 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.

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

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

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

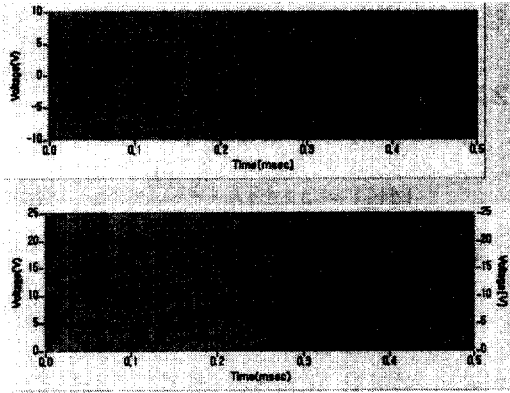


Fig. 3 Synchronous Detection Algorithm

철심과 센서 대상체(target)에서의 상대 투 자율이 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 offset와 같은 값으로 선정하며 상대적으로 큰 저항치를 연결한다.

변위신호를 추출하기 위해서는 v_1 의 진폭 변화를 분리하여야 하며 이는 동기 검출 회로를 이용하여 구현할 수 있다. Fig. 4에 변위 검출 회로 설계도를 나타낸다.

센서회로는 크게 4부분으로 나눌 수 있다. 우선 신호의 해당 성분 필터링을 위한 밴드 패스 필터, 필터링된 신호의 절대값을 취하는 회로부, 모노 스테이블을 이용한 피크의 검출회로와 샘플 앤드 홀드 회로로 나타낼 수 있다. 이러한 회로들을 거치면서 가진 신호의 진폭이 변화되어 변위 신호가 된다.

Fig. 5는 실제로 제작된 검출 회로 기판을 나타내고 있다.

3. 실험 장치

유도형 센서의 프로브는 전자석과 마찬가지로 코일과 철심으로 이루어진다. 그러나 여기서 중요한 것은 유도형 센서에는 가진 신호가 10kHz 이상의 고주파이므로 상대 투 자율이 큰 재료와 얇은 적층판으로 되어 있는 재료가 절대적으로 필요하다. 이는 고주파의 교번 자속이 생기는 경우에 와전류 및 히스테리시스 효과에 의해 자속밀도의 손실

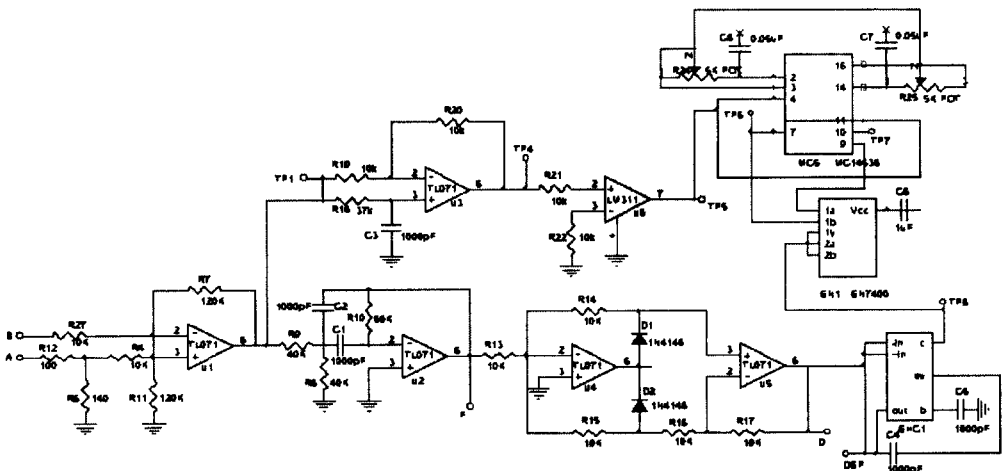


Fig. 4 A tested circuit of synchronous detection system

이 발생하며 실제 자기력의 크기가 작아지게 되는 문제점이 있다.

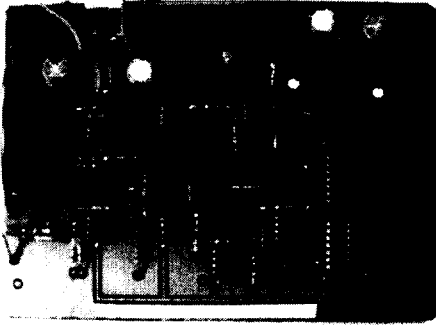


Fig 5 Sensor Circuit Board

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

Fig. 7은 본 실험에 사용한 센서 시험장치이다. 이번 실험에서는 1축인 x-스테이지(정도 0.5 μ m)만을 사용하여 실험하였다. 시험장치에 대상체를 놓고 x-스테이지를 움직여가며 그 출력 전압을 관찰하여 정적 특성의 데이터를 얻었다.

센서의 동특성은 가진기(exciter)를 이용하여 측정물을 일정 주파수로 가진하고 센서의 출력을 고정도 고주파수대역 와전류 센서의 출력과 비교함으로써 얻어졌다. 가진기로는

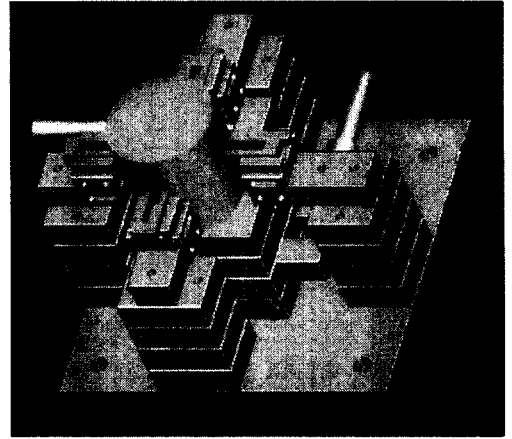


Fig. 7 Schematic diagram of sensing device

B&K4810이 사용되었고, 기준 신호 검출에는 0.1 μ m의 분해능과 80kHz의 주파수 대역을 가진 AEC5706 와전류센서가 사용되었다. 동적 특성을 실험하기 위한 실험 장치가 Fig. 8에 나타나 있다.

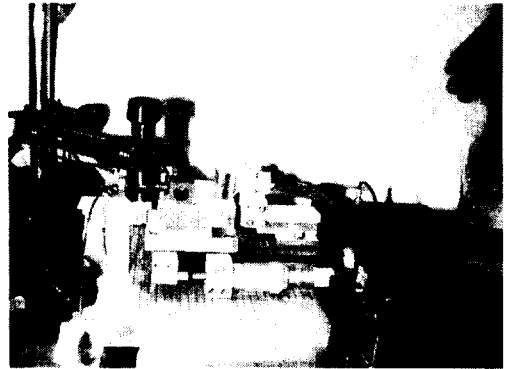


Fig. 8 Setup of dynamic testing

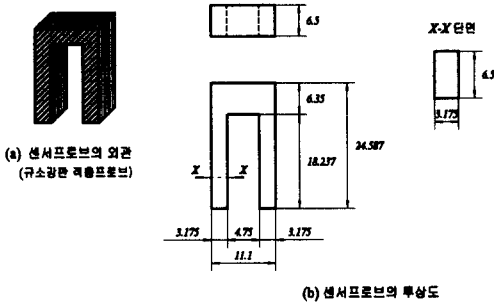


Fig. 6 Sensor Probe

4. 결과 및 고찰

센서회로의 작동 성능 확인을 위한 시작 프로브의 제원은 다음과 같다.

$$v_0 = 5 \text{ V}, \quad L_0 = 0.0015 \text{ H}, \quad R_1 = 1 \text{ k}\Omega, \quad R_2 = 5 \text{ k}\Omega, \quad \omega_0 = 20 \text{ kHz}$$

Fig. 9은 실제 실험하여 얻은 출력 전압 데이터를 선형회귀(linear regression)에 의한 선형

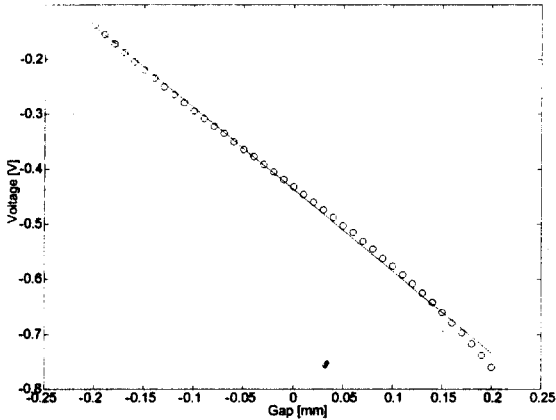


Fig. 9 Static test result

근사식과 함께 나타낸 것이다. 선형 오차는 4.4%인데, 이는 간극의 끝점에서 센서의 비선형성에 의한 것으로, 측정 범위를 제한하면 선형성을 향상시킬 수 있다.

Fig. 10은 센서의 동특성을 나타내는 실험 결과로 센서 이득값(gain)은 비교적 일정한 반면 위상값(phase)의 변화는 200Hz 이상에서 많은 변화를 보였다. 센서의 최종 사용 목적이 자기 베어링의 제어기에 필요한 정보를 제공하므로 과도한 위상차는 제어기의 불안정성을 야기할 수 있다. 주파수 대역을 향상시키기 위해서는 가진 주파수를 높이는 방법과 센서 회로에 포함된 필터의 성능을 향상하는

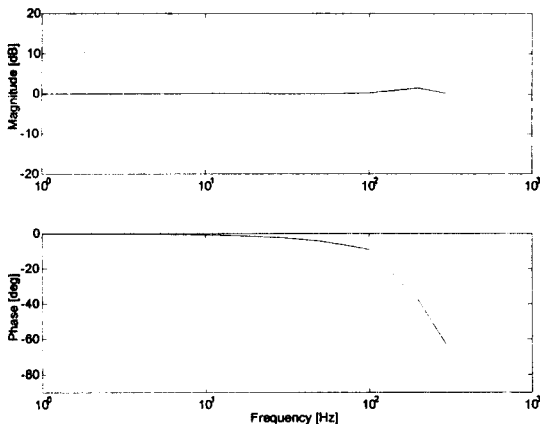


Fig. 10 Dynamic characteristic of the inductive sensor

방법이 있는데, 첫 번째 방법은 센서의 최대 주파수 대역(가진 주파수의 약 10분의 1)을 확장할 수 있지만 센서 회로를 구동하는데 과도한 전류가 필요할 수 있다. 센서 필터를 개선하면 센서의 최대 주파수 대역을 바꿀 수는 없지만 주어진 최대 주파수 대역 내에서의 동적 성능과 주파수 대역 밖의 허용 가능한 잡음간의 최적값을 구할 수 있다. 즉, 센서의 정특성을 향상시키기 위해서는 센서의 차수를 높이고 절점 주파수(cutoff frequency)를 낮추어야 하고, 동적 성능을 향상하기 위해서는 절점 주파수를 가능한 한 최대치로 올려야 한다.

5. 결론

본 연구는 자기부상 주축 시스템에 사용될 센서의 국산화를 목표로, 가격과 성능면에서 우수한 유도형 센서를 사용하여 실험을 통한 정적 특성과 동적 특성을 얻었다.

본 연구의 결과는 자기 베어링 공작 기계 주축계의 성능을 향상시키면서 생산 단가를 낮추고 국산화율을 높일 수 있는 가능성을 입증한다.

참고문헌

1. S. Moriyama et al, "Inductive Sensing System for Active Suspension Control," SENSOR/SELF-SENSING, p.529-537, 1988.
2. K. Mohri, "Magnetic Sensor," CORONA PUB. CO., 1998.