

고장 허용 유도형 위치 센서 설계

백승국* · 박병철** · 노명규†

(2007년 8월 24일 접수, 2008년 1월 16일 심사완료)

Design of Fault-Tolerant Inductive Position Sensor

Sung-Kuk Paek, Byeong-Cheol Park and Myounggyu D. Noh

Key Words : Fault-Tolerance(고장허용), Inductive Position Sensor(유도형 위치센서)

Abstract

The position sensors used in a magnetic bearing system are desirable to provide some degree of fault-tolerance as the rotor position is necessary for the feedback control to overcome the open-loop instability. In this paper, we propose an inductive position sensor that can cope with a partial fault in the sensor. The sensor has multiple poles which can be combined to sense the in-plane motion of the rotor. When a high-frequency voltage signal drives each pole of the sensor, the resulting current in the sensor coil contains information regarding the rotor position. The signal processing circuit of the sensor extracts this position information. In this paper, we used the magnetic circuit model of the sensor that shows the analytical relationship between the sensor output and the rotor motion. The multi-polar structure of the sensor makes it possible to introduce redundancy which can be exploited for fault-tolerant operation. The proposed sensor is applied to a magnetically levitated turbo-molecular vacuum pump. Experimental results validate the fault-tolerance algorithm.

기호설명

- A_p : 각 극의 면적
- f_s : 가진 주파수
- g_i : 각 극의 공기 간극
- g_0 : 중심에서의 공기 간극
- k : 직류전압 이득
- n_c : 각 극의 코일 권선수
- n_p : 극의 수
- V_{ps} : 스위칭 전압
- θ_i : 각 극의 각도

- ϕ_i : 공기 간극에서의 자속 밀도
- μ_0 : 공기의 투자율 $4\pi \times 10^{-7} H/m$

1. 서론

회전체 기계 시스템은 일반적으로 회전체의 진동을 감지하기 위해서 위치 센서를 사용한다. 특히, 자기 베어링을 사용하여 회전체를 부상하는 경우, 회전체의 변위를 측정하여 되먹임 제어를 하여야만 안정화될 수 있다.⁽¹⁾ 회전체의 변위는 자기 부상 시스템의 안정적인 동작에 필수적인 역할을 하기 때문에, 센서의 일부 고장에도 불구하고 정상적인 운전이 가능하다면 시스템의 신뢰도를 크게 향상할 수 있다.

고장허용 운전의 일반적인 방법은 시스템을 구성하는 요소 수준에서 그리고 시스템 수준에 중복성(redundancy)를 도입하는 것이다. 예를 들어서,

† 책임저자, 회원, 충남대학교 메카트로닉스공학전공
E-mail : mnoh@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-6877 FAX : (042)823-4919

* 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

** 한국전력 연구원

인공위성이나 우주왕복선에 흔히 사용되는 방법으로 삼중화구조(triple modular redundancy)를 이용하여 제어기의 고장허용을 가능하게 할 수 있다.⁽²⁾ 이는 제어입력 신호를 동일한 3 개의 제어기에 인가한 후 그 출력 값들을 비교하여 일부 제어기의 고장 유무를 판단하고, 정상적인 제어출력을 선택함으로써, 제어기 일부의 고장을 허용할 수 있다.

고장허용의 또 다른 방법은 시스템의 모델을 정확히 알고 있는 경우, 센서 출력과 모델로부터 추정된 출력을 비교함으로써 고장유무를 판단하고 적절히 대처하도록 하는 것이다.⁽³⁾ 별도의 센서 없이 시스템의 모델만으로 고장 감지를 할 수도 있으며 이러한 경우, 모델에 내재된 중복성(embedded redundancy)을 활용한다.⁽⁴⁾

자기 베어링 시스템의 회전체 변위 측정은 주로 와전류 위치 센서(eddy current displacement probe)를 사용하지만, 일반적으로 와전류 위치 센서는 고가이고 중복성 도입을 통한 고장 허용의 구현에 어려움이 있다. 본 논문에서는 회전체의 위치를 측정할 수 있고 부분적인 고장을 처리할 수 있는 유도형 위치 센서의 설계와 고장허용 방법에 대해 기술하고자 한다. 센서는 회전체 방향으로 다수의 극을 갖는 링 형태의 고정자로 이루어지며, 측정 코일은 각 극에 위치하게 된다. 이러한 다극형 구조로 인해 다자유도의 측정이 용이하게 된다. 다양한 코일의 권선 패턴을 이용하여 센서 출력에 중복성을 도입할 수 있으며, 이를 통해 고장허용 작동을 실현할 수 있다.

이전의 연구결과에서 자기베어링 시스템에서 센서 및 액츄에이터의 고장허용에 대해 기술한 바 있으나⁽⁵⁾, 제시된 센서의 모델이 단순한 1 차원 모델로서 센서의 설계 및 다양한 고장허용 방법을 고려하기에 부족함이 있었다.

본 논문에서는 자기 회로 모델로부터 다극 구조를 고려한 센서의 수학적 모델을 도출하고 센서의 민감도 손실 발생 시 센서 고장 감지 및 허용을 위한 여러 가지 권선 안을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 고장허용 센서는 자기부상 터보 분자 진공 펌프(turbo-molecular vacuum pump; TMP)에 적용되어 고장허용 작동을 실험으로 검증하였다.

2. 유도형 위치 센서

본 논문에서 제시하고 있는 유도형 위치 센서는 센서 고정자와 신호처리 회로 등으로 구성된다.⁽⁶⁾

Fig. 1 은 다극 링 (multi-polar ring) 형태의 고정

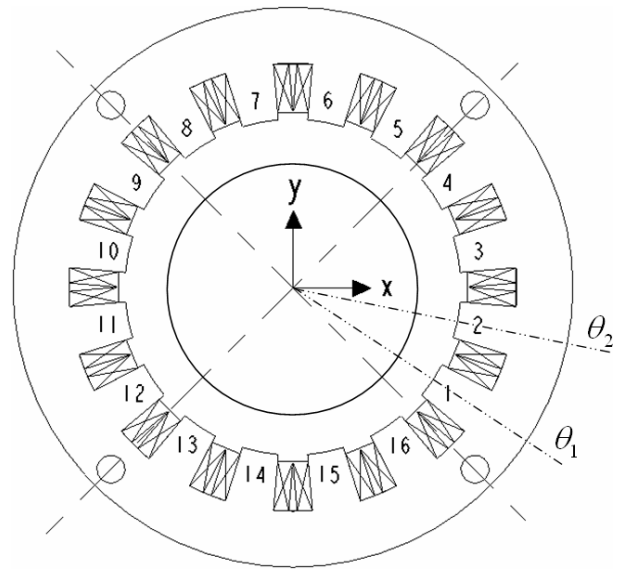


Fig. 1 Schematic diagram of the sixteen-pole sensor stator

자 단면을 보여준다. 고정자는 와전류 영향을 줄이기 위해 얇은 규소 강판을 적층하여 제작한다. 센서의 각 극은 독립적으로 회전자의 위치 검출용으로 사용될 수도 있고, 혹은 몇 개의 그룹으로 나뉘어져 사용될 수도 있다. 본 연구에서는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 16 개의 극을 가진 센서를 사용하였는데, 이를 4 개의 그룹으로 나누어 각각의 그룹에 속한 센서 코일을 직렬로 연결한 경우 마주 보는 2 개 그룹의 출력 차로 회전체의 한 방향을 감지할 수 있다. 고장허용 작동이 필요한 경우, 16 개의 극을 8 개의 그룹으로 나누어 동일한 과정을 거치게 되고, 센서는 총 4 개의 출력 신호를 갖게 된다. 이에 대해서는 다음 장의 자기회로 모델에서 구체적으로 기술되어 있다.

센서의 작동 원리는 센서 코일의 전압과 전류 신호 사이의 관계를 결정하는 유도계수(Inductance)가 공기 간극의 함수인 점을 이용하는 것으로, 센서 코일에 사각 파형의 고주파 전압 신호를 인가하고, 이로 인해 발생하는 삼각 파형 형태의 전류 신호를 측정하여 진폭에 내재된 위치 신호를 추출하는 과정을 거치게 된다 (Fig. 2 참조).

Fig. 3 은 센서 회로의 기능적 개략도를 보여준다. 본 연구에서는 센서 코일을 구동 시키기 위해 상용으로 흔히 사용되는 H-bridge 형 스위칭 증폭기(National Instrument LMD18200)를 이용하여 센서 증폭기를 구현하였다.

고역통과 필터(high-pass filter), 전파 정류기(full-wave rectifier), 저역통과 필터(low-pass filter)로 구성

된 복조 필터(demodulation filter)는 전류 파형의 진폭에 내재되어 있는 위치 정보를 추출한다. 고역 통과 필터는 전류 파형에서 스위칭 주파수에 해당하는 신호만을 전달하기 위해 사용되었고, 전파 정류기와 저역통과 필터를 통해 진폭 복조가 이루어진다. 이때, 신호 대 잡음 비율(signal-to-noise ratio)을 향상시키기 위해, 서로 마주보고 있는 두 개의 센서 출력의 차이를 각 축의 위치 추정 값으로 구하는 차동 방법(differential operation)을 사용한다. Fig. 4 는 제작된 센서 고정자와 신호 처리 회로를 보여준다.

3. 유도형 센서의 자기 회로 모델

회전축의 변위와 센서 출력 신호 사이의 수학적 관계는 자기 회로 이론을 이용하여 도출 할 수 있다. 원형 회전체의 위치 좌표를 (x, y) 로 표시하면 각 극의 공기 간극은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$g_i = g_0 - x \cos \theta_i - y \sin \theta_i \quad (1)$$

식 (1)에서 각 극의 각도는

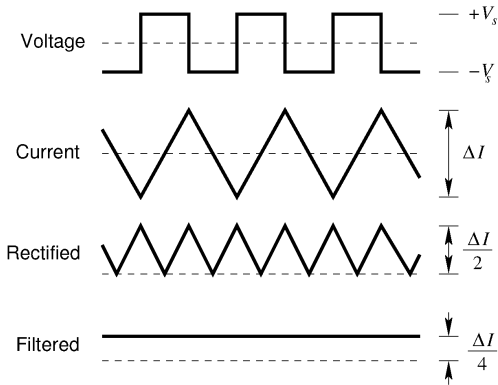


Fig. 2 Signal processing of the inductive position sensor

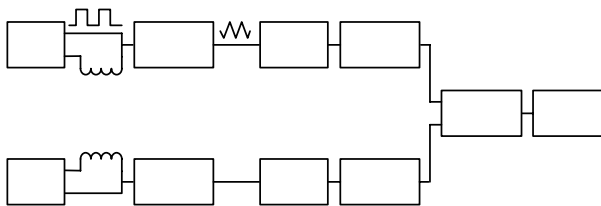


Fig. 3 Sensor signal processing

$$\theta_i = \theta_1 + \frac{2\pi}{n_p}(i-1), \quad i = 1, \dots, n_p \quad (2)$$

이 된다. 이때, θ_1 은 첫 번째 극의 각도이다.

Fig. 5 는 Fig. 1 의 16 극 센서의 고정자와 회전체의 저항을 무시하여 얻은 등가 자기 회로이다. 이 등가 자기 회로에 암페어 법칙(Ampere's circuital law)을 적용하여 15 개의 독립적인 식을 구할 수 있고, 자기 회로의 중심에서 자속 보존 법칙 (flux conservation law)을 사용하여 하나의 식을 얻게 된다. 구해진 식들을 행렬 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\mu_0 A_p} \begin{bmatrix} g_1 & -g_2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & -g_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & g_{15} & -g_{16} \\ g_0 & g_0 & g_0 & \dots & g_0 & g_0 & g_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \vdots \\ \phi_{15} \\ \phi_{16} \end{bmatrix} = n_c \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ i_{15} \\ i_{16} \end{bmatrix} \quad (3)$$

벡터-행렬 표시법을 사용하여, 식 (3)을

$$\mathbf{R}(x, y)\phi = \mathbf{N}_1 \mathbf{i} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (4)를 사용하여 공기 간극에서의 자속을 얻을 수 있다.

$$\phi = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{N}_1 \mathbf{i} \quad (5)$$



Fig. 4 Inductive position sensor and sensor signal processing circuit

기자력 권선 행렬(magneto-motive force winding matrix) \mathbf{N}_1 은 임의의 수의 극을 갖는 센서 코일의 상호 연결을 관계를 나타낸다. 예를 들어, 하나의 그룹을 형성하는 4 개 극에 코일이 직렬로 연결되어 있으면, Fig. 1 에서 보여지는 16 극 센서의 권선 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{N}_1 = n_c \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

각 코일의 저항에 의한 전압 강하를 무시하면 전압 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{V} = \mathbf{N}_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

이때, 4 극의 경우 코일의 권선 행렬(coil winding matrix) \mathbf{N}_2 는 다음과 같다.

$$\mathbf{N}_2 = n_c \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (5)와 (7)을 사용하여 인덕턴스 행렬을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{L} = \mathbf{N}_2 \mathbf{R}^{-1} \mathbf{N}_1 \quad (9)$$

$\pm V_{ps}$ 의 사각 파형 전압이 f_s 라는 가진 주파수로

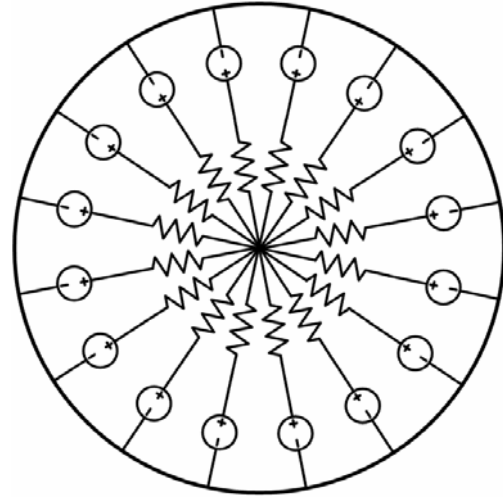


Fig. 5 Stator equivalent magnetic circuit of sixteen-pole inductive sensor

코일에 인가되면, 센서의 출력은 전류 리플(ripple)의 절대 값(peak-to-peak) 크기에 비례한다.

$$\Delta \mathbf{I} = \frac{V_{ps}}{2f_s} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{1}_{4 \times 1} \quad (10)$$

식 (10)에서 $\mathbf{1}_{4 \times 1}$ 은 각 요소가 1로 이루어진 4×1 행렬이다. 전파 정류 과정은 전류파형의 리플을 1/2로 감소시키고, 저역 통과 필터를 통과한 후의 값은 이상적으로 볼 때 파형의 평균값이 된다. 따라서 필터의 출력 값을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{u} = \frac{V_{ps}}{8f_s} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{1}_{4 \times 1} \quad (11)$$

마주보는 그룹의 평균값의 차이가 센서 출력이므로, 센서 출력은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \frac{kV_{ps}}{8f_s} \mathbf{D} \mathbf{L}^{-1} \mathbf{1}_{4 \times 1} \quad (12)$$

이때, 차동 행렬(differential matrix) \mathbf{D} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

센서의 감도(sensitivity) 행렬은

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{xx} & s_{xy} \\ s_{yx} & s_{yy} \end{bmatrix} \quad (14)$$

이고, 이때 $s_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial j}$, $i, j = x, y$ 이다.

식 (12)를 각각 x 와 y 로 편미분하여 식 (14)의 감도(sensitivity) 행렬을 구할 수 있다. 하지만 \mathbf{L}^{-1} 를 x, y 의 함수로 구하는 것은 매우 복잡하다. 따라서 본 논문에서는 회전체의 이동이 없는 특정 지점에서 감도(sensitivity)를 구한다. 이때, 아래와 같은 행렬 미분 규칙을 사용하여 감도(sensitivity) 행렬을 구한다.

$$\frac{\partial \mathbf{A}^{-1}}{\partial x} = -\mathbf{A}^{-1} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \mathbf{A}^{-1}$$

예를 들어, Fig. 1 의 16극을 4 개의 그룹으로 나누어 차동을 측정하는 센서의 감도(sensitivity)는 다음과 같다.

$$\mathbf{S} = -\frac{8kV_{ps}}{\mu_0 n_c^2 A_p f_s} \begin{bmatrix} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) & 0 \\ 0 & (\sin \theta_3 + \sin \theta_4) \end{bmatrix} \quad (15)$$

4. 고장 허용 알고리즘

고장 허용(fault-tolerance) 작동을 위해 가장 흔히 사용되는 방법은 중복성을 갖게 하는 것이다. 본 논문에서 기술하는 유도형 센서의 다극 구조는 중복성을 생성하기에 용이하다. Fig. 6 에서 보는 바와 같이, 16극 센서에서 이웃하는 2 개의 고정자에 직렬로 코일을 감아주고 반대편의 코일과 함께 하나의 센서 채널을 이루면, 총 4 개의 채널을 얻을 수 있다. 각 채널의 각도를 각각 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 라고 한다면, 4 채널의 출력과 변위와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ \cos \theta_3 & \sin \theta_3 \\ \cos \theta_4 & \sin \theta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (16)$$

식 (16)을 행렬 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (17)$$

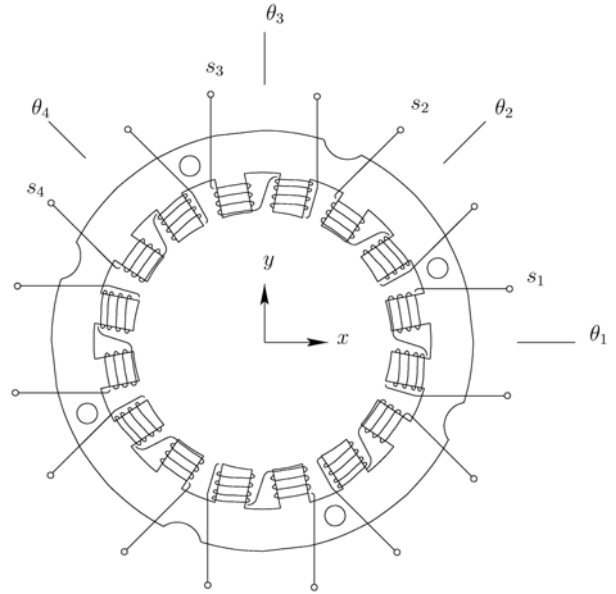


Fig. 6 Winding pattern of the sensor to introduce the redundancy

식 (17)은 유일 해를 갖지 않으므로 의사역행렬(pseudo-inverse matrix)를 이용하여 아래와 같이 최적해를 구다.

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{u} = \mathbf{G}_s \mathbf{u} \quad (18)$$

예를 들어, 4 개의 모든 채널이 작동을 할 때 최적해는

$$\mathbf{G}_s = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

이 된다. 하나의 채널이 고장이 났을 경우, 행렬 \mathbf{A} 에서 대응되는 열을 제거함으로써 센서 개인 행렬 \mathbf{G}_s 를 구할 수 있다.⁽⁷⁾ 즉, i 번째 채널이 고장 났을 경우의 센서 개인 행렬을 \mathbf{G}_{si} 라고 하면, i 번째 채널 출력을 제외한 나머지 채널의 출력 값으로부터 센서 출력을 얻을 수 있다. 센서 고장을 감지하기 위해서, 식 (20)을 사용해서 추정 위치를 계산한다.

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{G}_{si} \mathbf{u} \quad (20)$$

Table 1 Specifications of inductive sensor prototype

Parameters	Values
Excitation voltage	48 V
Excitation frequency	20 kHz
Nominal radial air gap	0.5 mm
Number of stator poles	16 poles
Number of coil turns per pole	80 turns
Outside diameter of the stator	70 mm
Inner diameter of the stator	44 mm
Thickness of the lamination	0.35 mm
Axial thickness	3.15 mm
Cut-off frequency of high-pass filter	4.08 kHz
Cut-off frequency of low-pass filter	1.59 kHz

다시 말해서, 회전체의 위치 \mathbf{x}_1 의 추정 값은 측정 한 것으로부터 u_1 을 제거하여

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{4} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{2}}{4} \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (21)$$

이 된다.

추정 출력과 실제 출력과의 오차는

$$e_i = \|\mathbf{u} - \mathbf{A}\mathbf{x}_i\|_2 \quad (22)$$

와 같이 구할 수 있다. 이렇게 구한 오차가 0 이거나 0 에 매우 근접하면 센서가 정상 작동을 하는 중이다. 하지만, 어느 한 오차가 다른 3 개의 오차와 비교해서 크다면, 그에 해당하는 채널은 고장 상황으로 판단되고, 측정에서 제외된다. 고장 상황에서의 위치 추정은 식 (18)이 아닌 식 (20)으로 계산된다.

5. 실험 결과

5.1 시제품 센서의 성능

본 연구에서는 실험에 사용할 센서를 설계하여 제작하였다.⁽⁶⁾ Table 1 은 유도형 위치 센서의 세부 항목들을 나타낸 것이다. 고역통과필터의 차단 주파수는 4.08kHz 인데, 이는 20kHz 의 스위칭주파수에 해당하는 전류파형을 추출하기 위함이다. 저역통과필터의 차단주파수는 센서의 동적 특성과 직접적인 관계가 있는데, 동적 성능을 향상시키기

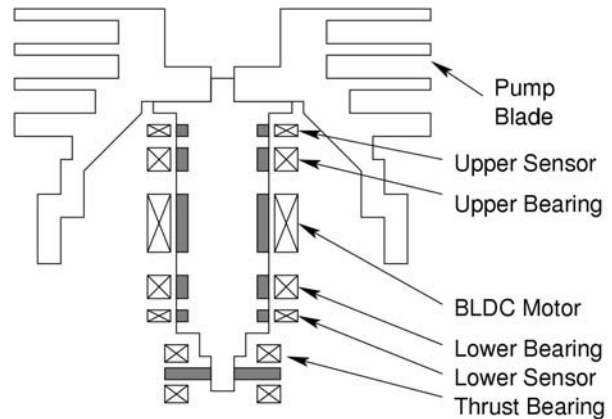


Fig. 7 Schematic diagram of a magnetically levitated turbo-molecular pump showing its major components

위해 차단 주파수를 높이면 센서 출력에 스위칭 성분이 증가하게 되어 센서의 정확도를 떨어뜨리게 된다.

제작된 센서의 특성과 성능⁽⁶⁾을 간략히 기술하면 정적 성능의 경우 측정거리 0~0.4mm 구간에서 0.5% 이내의 선형 오차를 가지고 있으며, 0.5 μ m 이내의 위치 분해능을 가진다. 센서의 동적 대역폭(dynamic bandwidth)은 0 에서 800 Hz 사이로 측정되었다. 동적 대역폭을 향상시키기 위해서, 센서 구동 회로의 변조 주파수를 증가시킬 수 있다. 하지만, 변조 주파수가 높아짐에 따라 와전류의 영향도 커지게 되어 센서 성능을 저하시키게 된다.

5.2 고장 허용 실험

본 논문에서 기술하는 고장 허용 알고리즘의 실효성을 검증하기 위해, 실험 장치를 제작하였다. 이 실험 장치는 자기부상 터보분자 진공펌프로 구성되어 있다. 펌프는 한 쌍의 반경 방향 자기 베어링(radial bearing)과 축 방향으로의 움직임을 제어하기 위한 축 방향 자기 베어링(thrust bearing)으로 구성되어 있다. 자기 베어링은 개 루프 제어로는 불안정하기 때문에, 안정적인 회전체의 위치를 제어를 위해서는 되먹임 제어가 필요하다. 본 논문에서 제시하고 있는 유도형 센서는 자기 베어링에 신호를 피드백(feedback)하여 자기 베어링의 코일 전류를 제어 한다. Fig. 7 은 터보분자 펌프의 주요 구성 요소들을 도식적으로 보여준다.

Fig. 8 에 보이는 DSP 제어기(dSPACE DS1104)는 부상을 위해 피드백 제어를 수행하고 고장 감지와 고장 허용 알고리즘을 실행한다. DSP 제어기는 식 (22)에 의한 오차 들을 계산한다. 그리고 오차 들 중에서 다른 값들과 큰 차이가 있는지를 확인

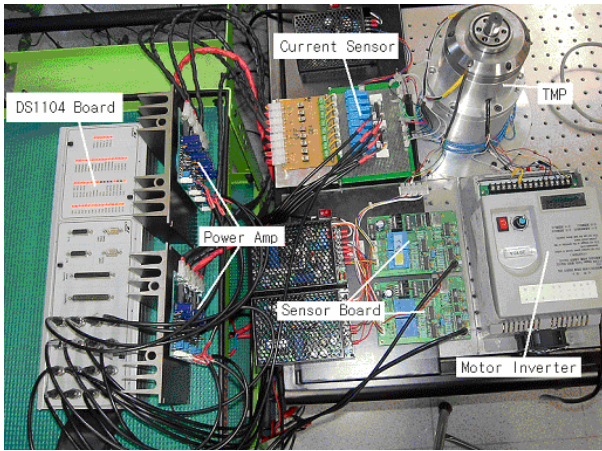


Fig. 10 Picture of experimental setup

한다. 만약 센서 고장이 감지되면, 남아있는 신호들로부터 새로운 위치 추정 값이 계산된다. 이때, 제어기의 샘플링 속도는 20 kHz 이다.

5.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 9 와 Fig. 10 에 고장허용 작동 실험의 결과가 나타나 있다. Fig. 9 는 펌프 회전자가 정지 부상된 상태에서의 결과로서, 센서 출력 중 하나의 연결을 강제적으로 끊음으로써 고장 상황을 구현하였다. 실험 시작 후 0.22 초 지점에서 고장이 연 출되었을 때, 약 0.05 초 정도의 구간에서 부상에 영향을 미치고, 다시 정상 상태를 회복하였다. Fig. 10 은 펌프 회전자가 3400rpm 으로 회전하고 있는 상태에서 실험한 결과로서, 시작 후 0.26 초에 도입된 고장에도 불구하고, 펌프가 정상작동됨을 확인할 수 있다.

식 (16)에서 알 수 있는 바와 같이, 회전자의 위치가 회전 중심에 정확히 고정되어 있는 경우, 센서 출력이 모두 같은 값을 갖게 되어 4 절에서 기술한 고장허용 방법이 제대로 작동하지 않을 수 있다. 일반적인 자기부상 시스템의 경우, 회전자가 완벽히 회전 중심에 고정되어 있지 않고, 외란에 의해 항상 약간의 움직임을 보인다. 또한, 순간적으로 회전 중심을 지나는 경우, 고장으로 감지하여 오작동되는 경우를 방지하기 위해, 고장이 감지된 후 일정시간 동안 고장이 계속되는 지를 판단하여 고장 감지 및 허용의 신뢰도를 향상할 수 있다.

본 논문에서 제안한 방법은 센서 코일이 개회로(open-circuit)되어 해당 채널의 전류 신호가 0 으로 가는 경우를 가정하였다. 다른 형태의 고장 유형에 대해서는 각각의 유형에 따라 새로운 고장허용

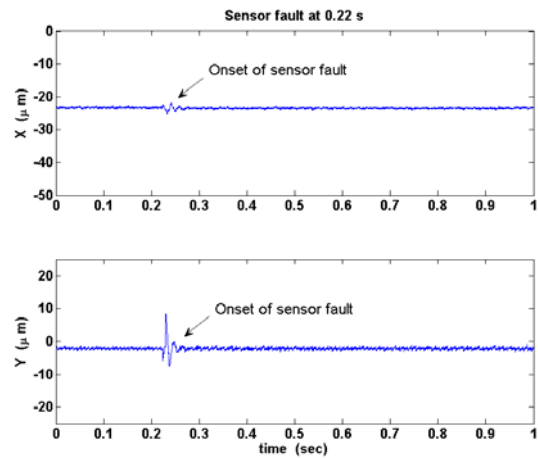


Fig. 8 Rotor positions before and after the sensor faults (Rotor at standstill)

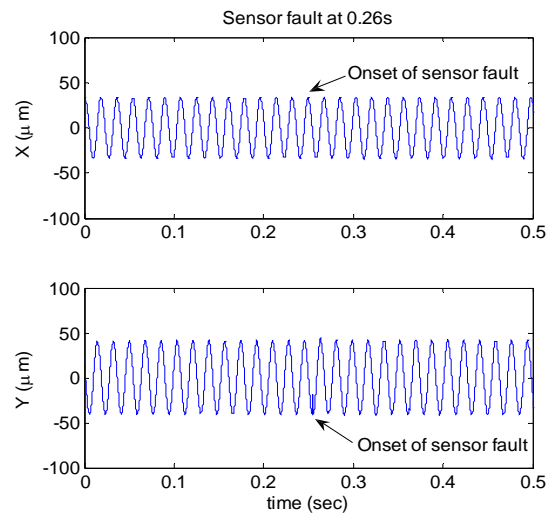


Fig. 9 Rotor positions before and after the sensor faults (Rotor running at 3,400rpm)

방법에 제시되어야 할 것이다. 그러나, 고장에 따른 전류의 변화가 예측 가능한 경우, 신호처리회로나 제어기에서 고장을 감지한 후 본 논문의 방법을 활용할 수 있다. 예를 들어, 센서 코일이 단락 되어 코일 전류가 급상승하는 경우, 센서 신호 처리회로에서 이를 감지한 후, 해당하는 센서 출력을 강제적으로 접지하면, 앞서 기술한 고장허용 방법을 동일하게 적용할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 자기 베어링 시스템에 사용하기 위한 고장 허용 위치센서에 대하여 기술하였다. 제작한 센서를 사용한 실험 결과는 고장 허용 알고리즘의 타당성을 보여준다. 신호 처리 회로나

제어기가 복잡해지는 것을 감수한다면, 센서의 고장허용 정도를 높일 수 있다. 예를 들어, 센서의 모든 극이 독립적으로 출력을 발생하면 그 중 일부가 작동하지 않더라도, 회전체의 위치를 신뢰도 있게 추정할 수 있다. 이를 위해 자기 베어링의 고장 허용 알고리즘⁽⁸⁾이 이용될 수도 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Chang, I. B. and Han, D. C., 1995, "Performance of Built-in Capacitance Type Transducer of a Magnetic Bearing System," *J. KSME*, Vol. 19, No. 9, pp. 2082~2088.
- (2) Maslen, E. H., Sortore, C. K., Gillies, G. T. and Williams, R. D. 1999, "Fault Tolerant Magnetic Bearings," *J. Eng. Gas Turbine Power*, Vol. 121, pp. 504~508.
- (3) Jeong, Y., Sul, S.-K., Schulz, S. E. and Patel, N. R., January/February 2005, "Fault Detection and Fault-Tolerant Control of Interior Permanent-Magnet Motor Drive System for Electric Vehicle," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, pp. 46~51.
- (4) Kral, C., Pirker, F. and Pascoli, G., May/June, 2005, "Model-Based Detection of Rotor Faults Without Rotor Position Sensor – the Sensorless Vienna Monitoring Method," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, pp. 784~789.
- (5) Noh, M. D., Cho, S.-R., Kyung, J.-H., Ro, S.-K. and Park, J.-K., 2005, "Design and Implementation of a Fault-Tolerant Magnetic Bearing System for Turbo-Molecular Vacuum Pump," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 10, pp. 626~631.
- (6) Noh, M. D., Jeong, M. K., Park, B. C., Park, J. K., and Ro, S. K., 2002, "Development of Low Cost Inductive Sensor Using Switching Noise Demodulation," in *Proceedings of Eighth International Symposium on Magnetic Bearings*, Mito, Japan.
- (7) Loesch, F., 2002, "Detection and Correction of Actuator and Sensor Faults in Active Magnetic Bearing Systems," in *Proceedings of Eighth International Symposium on Magnetic Bearings*, Mito, Japan.
- (8) Meeker, D. C., 2005, "Optimal Solutions to the Inverse Problem in Quadratic Magnetic Actuator," Ph. D. Thesis, The University of Virginia.