

자기베어링용 로우터의 형상 오차에 대한 실린더형 캐패시턴스 센서의 측정특성에 관한 연구

이 상 호,* 정 성 천,* 장 인 배,** 한 동 철***

A Study on the Measurement Characteristics of Cylindrical Type Capacitive Transducers to the Roundness Errors of Rotor for Magnetic Bearing

Sang-Ho Lee,* Sung-Cheon Jung,* In-Bae Chang** and Dong-Chul Han***

ABSTRACT

The sensing characteristics of the non-contact type displacement transducers can affect the performances of the magnetic bearing systems when they support the rotating shaft. The probe type displacement sensor detects not only the displacement of the rotor at the sensing position but also the surface irregularities of the rotor such as surface roughness and roundness errors. If there exist such measuring errors, the magnetic bearing can not apply proper forces against the rotor displacements for the detected signal is the input to the magnetic bearing controllers. The cylindrical shape capacitive transducer can detect the rotor displacement by the integral sum of the charges which are formed between the sensor plates and rotor so that it can reduce the detecting errors induced by the surface irregularities of the rotor. By theoretical analysis, we compared the sensing characteristics of the cylindrical shape capacitive transducers for the rotors that have some sinusoidal irregularities with that of the ideal probe type displacement transducers.

Nomenclature		e	eccentricity	$[m]$
		E	electric field	$[V/m]$
A	area	i	current	$[A]$
C	capacitance	q	charge	$[C]$
d	distance	r	radius	$[m]$

* 서울대학교 대학원 기계설계학과

** 서울대학교 터보-동력기계 연구센터

*** 서울대학교 기계설계학과

T	time	(sec)
V	voltage	(V)
ϵ_0	permittivity	(C^2/Nm^2)
θ	attitude angle	(rad)
κ	dielectric constant, correction factor	
ξ	rotation angle of rotor	(rad)

1. 서 론

자기 베어링에 장착되어 회전축의 변위를 측정하는 비접촉 변위 센서로는 다양한 종류가 사용되고 있지만 자기 베어링의 설치공간, 센서의 형상 및 자기 베어링에서 발생된 자장의 영향 등에 기인하여 그 사용이 제한된다. 자기 베어링에서 회전축의 변위 측정에 가장 일반적으로 사용되는 와전류 구동형 변위 센서는 가격이 저렴하고 설치 및 사용이 용이하나 자장의 영향을 받기 때문에 자기 베어링의 폴로부터 최소한 1 in(25.4 mm) 이상을 띄워 설치해야만 한다.⁽¹⁾ 이와 같은 자기 베어링의 작동위치와 측정위치의 불일치는 연성축의 고차 모드에서의 안정성 문제를 유발한다.⁽²⁾

일반적인 변위센서들은 저어널 표면의 한 점을 측정하므로 저어널의 가공오차 및 표면조도 등이 측정된 변위신호에 혼합되어 저어널 기하학적 중심의 정확한 위치변화를 측정할 수 없다. 이와 같은 위치측정오차는 자기베어링 제어기의 제어 연산에 그대로 유입되어 교란 요소로 작용하므로 자기 베어링의 정확한 위치제어를 어렵게 한다. 변위측정시 저어널의 각종 교란 요소들이 변위신호에 혼합되는 것을 방지하며 저어널 기하학적 중심의 위치변화를 정확히 측정하기 위해서는 대상물의 평균변위를 감지할 수 있는 판(plate)형 캐패시턴스 센서를 사용하는 것이 바람직하다.⁽³⁾ 판형 캐패시턴스 센서는 대상물의 변위를 센서판과 대상물 사이에 집적된 전하의 양을 이용하여 측정하기 때문에 대상물의 가공상태에 관계없이 저어널의 위치변화를 정확히 측정할 수 있을 뿐만 아니라, 자장의 영향을 받지 않기 때문에 자기 베어링에 최대한 가까이 장착할 수 있어서 자기 베어링과 센서의 위치 불일치 문제를 개선할 수 있다.

Salazar⁽⁴⁾는 판형 캐패시턴스 센서를 장착한 자기 베어링 시스템을 이용하여 이론적인 스텝함수에 대한 시스템의 응답특성을 이론 및 실험적으로 고찰하였으나 시스템의 안정성 및 자장의 영향등에 기인하여 만족할

만한 결과를 도출해 내지는 못했다. Chapman⁽⁵⁾은 공기베어링에 지지되는 초정밀 주축의 회전오차 측정을 위하여 판형 캐패시턴스 변위측정 시스템을 개발하였으며 장⁽⁶⁾은 Chapman의 시스템을 응용하여 실린더형 캐패시턴스 센서가 내장된 자기 베어링 시스템을 개발하였다.

본 연구에서는 형상불균일을 갖는 로우터에 대한 실린더형 캐패시턴스 센서의 위치 측정 특성을 회전축의 변위측정에 일반적으로 사용되는 프루브형 변위센서와 비교함으로써 로우터의 형상 불균일이 센서의 위치측정에 끼치는 영향에 대하여 고찰해 본다.

2. 실린더형 캐패시턴스 센서

2.1 캐패시턴스 센서의 측정이론

서로 마주보는 두개의 도전성 판 사이에 전위차가 존재한다면 양자간에 형성된 캐패시턴스 양은 판의 면적에 비례하며 거리에 반비례하는 특성을 갖는다.

$$C = \frac{q}{V} = \frac{\kappa \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d} \tag{1}$$

이때, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} [C^2 / Nm^2]$ 는 permittivity 상수이다. 전하량 q 는 전류 i 와 캐패시터의 충전시간 T 의 곱으로 표시할 수 있다.

$$q = i \cdot T \tag{2}$$

그러므로 (2) 식을 이용하여 (1) 식을 전위차 V 의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$V = \frac{(i \cdot T)}{\kappa \cdot \epsilon_0 \cdot A} \cdot d \tag{3}$$

그러므로 센서판의 면적이 일정하다면 서로 마주보는 두 판 사이의 전위차 V 는 캐패시터가 포화되기 전까지는 충전시간 T , 전류 i 및 판 사이의 거리 d 에 비례한다. 그러므로, 캐패시턴스 양으로부터 (3) 식을 통하여 센서판과 대상물 사이의 거리를 측정하는 비접촉 변위 측정 시스템을 구성할 수 있다. 그런데, 실제의 경우 전하 q 는 (2) 식과는 달리 지수 함수적인 특성을 보이므로 판 사이의 전위차 V 도 거리 d 에 대해 지수함수적인 경향을 보이게 된다.⁽⁶⁾

이 원리를 이용하여 Fig. 1에서와 같이 로우터의 변위를 측정하기 위해 자기 베어링에 내장된 실린더형 캐

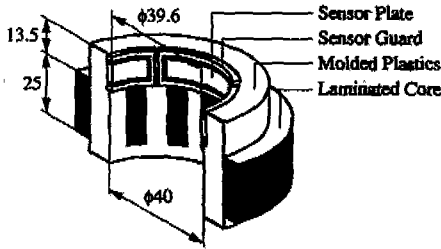


Fig. 1 Perspective view of the magnetic bearing and sensor plates

패시턴스 센서⁽⁶⁾를 구성하였으며 해석의 대상으로 사용된 캐패시턴스-전압 변환 (C/V) 회로⁽⁶⁾와 해석을 위하여 이상화된 회로를 Fig. 2에 도시하였다.

Fig. 2에서 C_s , C_g 및 C_b 는 각각 센서, 가드 및 부트 스트랩의 캐패시턴스 양이다. 해석에 있어서 Fig. 2(a) 우측의 전압 추출 회로를 제외하고 Fig. 2(b)와 같이 이상화된 회로를 구성한다. 이상화된 회로는 두개의 전류 루프를 구성하며 전류는 Fig. 2(b)와 같이 시계방향으로 흐른다고 가정한다. 이에 따라 다음과 같은 두개의 폐로방정식이 구성된다.

loop 1:

$$R_M(i_{11} - i_{12}) + \frac{1}{C_S} \int (i_{11} - i_{12}) dt = 5$$

loop 2:

$$R_M(i_{12} - i_{11}) + \frac{1}{C_S} \int (i_{12} - i_{11}) dt + \frac{1}{C_B} \int i_{12} dt + R_K i_{12} + \frac{1}{C_G} \int i_{12} dt = 0$$

(4) 식을 미분 방정식으로 만들기 위하여 $i_{11} = \frac{dq_1}{dt}$,

$i_{12} = \frac{dq_2}{dt}$ 를 대입한 후 정리한다.

$$R_M \frac{dq_1}{dt} - R_M \frac{dq_2}{dt} + \frac{1}{C_S} (q_1 - q_2) = 5 \quad (5)$$

$$R_K \frac{dq_2}{dt} + \frac{q_2}{C_B} + \frac{q_2}{C_G} = 5$$

위의 두 미분방정식은 동차해와 특수해를 갖는다.

$$q_1 = q_{1t} + q_{1s} \quad (6)$$

$$q_2 = q_{2t} + q_{2s}$$

동차해를 구하기 위하여 다음과 같이 해를 지수함수로 가정한다.

$$q_{1t} = K_1 \cdot e^{p_1 t} \quad (7)$$

$$q_{2t} = K_2 \cdot e^{p_2 t}$$

(5) 식의 우변을 0으로 놓고 (7) 식을 대입하여 정리하면 동차해가 다음과 같이 구해진다.

$$q_{1t} = K_1 e^{-\frac{1}{R_M C_S} t} + K_2 e^{-\frac{C_B + C_G}{R_K C_B C_G} t} \quad (8)$$

$$q_{2t} = K_2 e^{-\frac{C_B + C_G}{R_K C_B C_G} t}$$

특수해는 제의 정상상태 응답으로 다음과 같다.

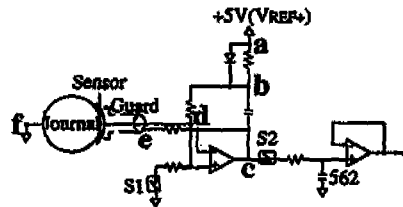
$$q_{1s} = 5 \left(C_S + \frac{C_B C_G}{C_B + C_G} \right) \quad (9)$$

$$q_{2s} = \frac{5 C_B C_G}{C_B + C_G}$$

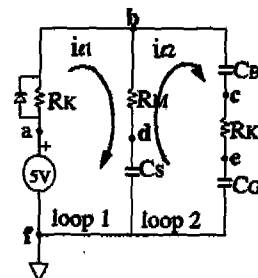
Fig. 2(a)에 따르면 OP 앰프의 작동원리상 c 점에서 전압은 d 점에서의 전압과 동일하므로 C/V 회로에서의 출력단 전압 $V_d(t) = V_c(t)$ 이며

$$V_d(t) = \frac{1}{C_S} \int (i_{11} - i_{12}) dt = \frac{q_1}{C_S} - \frac{q_2}{C_S} \quad (10)$$

Fig. 2(a)에서 스위치 S1이 열리는 순간의 전압 $V_d(t)$



(a) real circuit



(b) idealized circuit (S1 is closed)

Fig. 2 Capacitance to voltage conversion (C/V) circuit

= 0) = -10[V]이므로 이를 (10) 식에 대입하면 상수 K_1 를 구할 수 있다.

$$K_1 = -15 C_s \quad (11)$$

본 논문에서 모델링된 C/V 회로의 경우 $R_x = 10^6[\Omega]$, $R_M = 10^6[\Omega]$ 이며 $C_b = 0.068 \mu F$ 이므로 (10) 식을 정리한 후 C_s 를 (1) 식을 사용하여 간극의 함수로 표현하면 V_d 는 다음과 같이 정리된다.

$$V_d(d) = 5 - 15 \cdot e^{-\frac{dT}{\kappa \epsilon_0 A_s \times 10^6}} \quad (12)$$

이때 A_s 는 센서판의 단면적이며 $T = 80 \mu s$ 는 캐패시턴스 센서의 충전시간이다. 이는 서로 마주보는 두개의 이상적인 평행판에 대하여 도출된 식으로 실제의 경우에는 두개의 판을 이상적인 평행으로 맞출 수 없으며, 측정회로에서의 손실도 존재하므로 단일 평행형 캐패시턴스 센서를 사용한 변위민감도 측정실험 결과를 고려하여 이를 보정하여야 한다. 단일평행형 센서를 사용하여 변위민감도를 측정된 결과⁽⁶⁾ 실험적으로 얻을 수 있는 최대 측정전압은 4V이며 최저 측정전압은 -2V이므로 (12) 식의 두 상수 5와 -15는 각각 4와 -6으로 보정된다.

$$V_d(d) = 4 - 6 \cdot e^{-\frac{dT}{\kappa \epsilon_0 A_s \times 10^6}} \quad (13)$$

2.2 변위민감도의 보정

판형 캐패시턴스 센서의 비선형적인 측정특성을 보정하여 선형적인 측정영역을 넓히기 위하여 센서판은 90° 간격으로 로우터 주위에 4개를 설치하며 서로 마주보는 두개의 센서로부터의 출력전압을 차동증폭한다. 이에 따라 수평 및 수직방향 센서조합의 출력전압 V_y 및 V_z 는 다음과 같다.

$$V_y = V_{dA} - V_{dB} \quad (14)$$

$$= 6 \left(e^{-\frac{(g+y)T}{\kappa \epsilon_0 A_s \times 10^6}} - e^{-\frac{(g-y)T}{\kappa \epsilon_0 A_s \times 10^6}} \right) \quad (15)$$

$$V_z = V_{dL} - V_{dR} \\ = 6 \left(e^{-\frac{(g+z)T}{\kappa \epsilon_0 A_s \times 10^6}} - e^{-\frac{(g-z)T}{\kappa \epsilon_0 A_s \times 10^6}} \right)$$

이때, 센서 실린더와 로우터 사이의 기준간극 g 를 0.3 mm로 주었으며, 각 센서 증폭기로부터의 출력전압 V 의 하첨자 U, B, L, R는 각각 상, 하, 좌, 우의

센서위치를 의미한다.

센서판과 로우터 사이에서의 누전을 방지하기 위해 표면에 착색한 코팅재료의 특성 및 센서의 가공상태에 기인하여 출력전압의 변화율이 결정된다. 이를 보정하기 위하여 유전을 상수 κ 를 보정계수로 사용하였으며 자기 베어링에 내장된 실린더형 캐패시턴스 센서에 대한 변위 민감도 측정실험을 통하여 보정계수는 3으로 정하였다.

이론적으로 도출된 변위 민감도 식을 검증하기 위하여 마이크로미터로 구동되는 X-Y 테이블을 사용하여 로우터를 이송하면서 Fig. 1의 자기 베어링에 내장된 캐패시턴스 센서 조합의 변위 민감도를 실험적으로 측정하였다. 측정된 변위 민감도는 Fig. 3에서 해석결과와 비교되어 있다. Fig. 3에서 변위 민감도 S의 하첨자는 각각 방향별 민감도 및 연계(coupled) 민감도를 의미한다. 변위 민감도 측정결과, 선형영역은 센서 실린더의 중심으로부터 각 방향으로 $\pm 70 \mu m$ 의 범위이며 이때의 변위 민감도는 약 2.3 V/mm이다. 또한 선형영역을 넘어선 범위에서는 변위 민감도가 증가함을 알 수 있다. 그리고 이론적으로 도출된 변위 민감도는 실험 결과를 고려하여 상수항 및 지수항의 보정을 수행하면 실제의 측정특성을 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다.

3. 형상불균일을 갖는 로우터

원형으로 가공된 로우터의 표면에는 가공상태에 기인하여 수 μm 크기의 진원도 오차와 표면조도 등의 가공 오차가 존재하며, μm 단위의 측정이 가능한 비접촉 변

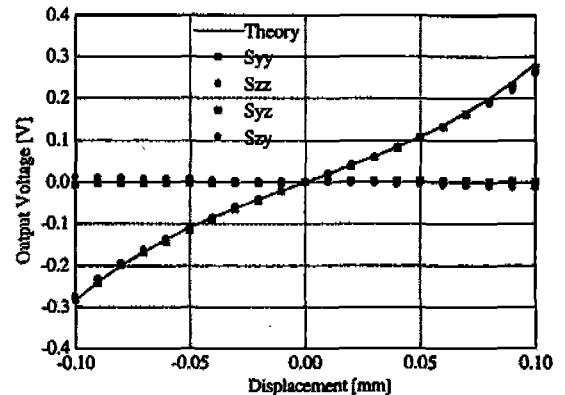


Fig. 3 Displacement sensitivities of cylindrical capacitive transducers

위측정 시스템으로 로우터의 회전궤적을 측정하면 측정된 변위 신호에는 로우터의 가공오차가 혼합되어 정확한 회전궤적의 측정이 어렵게 된다. 이러한 현상은 측정된 회전궤적을 토대로 귀환제어를 수행하는 자기 베어링의 경우 매우 심각한 안정성 문제를 유발할 수 있다. 그러므로 본 장에서는 형상 불균일이 존재하는 로우터가 임의의 자세각과 회전반경을 갖고 회전할 때 판형 캐패시턴스 센서와 일반적인 프루브형 변위 센서의 회전궤적 측정특성을 이론적으로 도출한다.

임의의 주기의 표면 불균일이 표면에 중첩된 로우터의 기하학적 형상은 다음과 같이 정현함수의 표면불균일을 갖는다고 가정한다.

$$r(\varphi) = r_R + r_{m1} \cdot \cos n_1(\varphi - \xi) + r_{m2} \cdot \cos n_2(\varphi - \xi) \quad (16)$$

이 때 r_R 은 로우터 기준면의 반경이며, r_{m1} 및 n_1 은 가공형상 오차의 진폭 및 주기이며, r_{m2} 및 n_2 는 로우터 표면 조도의 진폭 및 주기를 나타낸다. ξ 는 로우터의 회전각을 표시하며 φ 는 로우터 중심 좌표계 $o-y-z$ 에서의 로우터 표면상의 한 점의 위치각을 나타낸다. Fig. 4에서와 같이 로우터는 자세각 θ 편심량 e 를 중심으로 하여 로우터의 기하학적 중심이 회전반경 r_0 를 갖고 회전하는 것으로 모델링한다.

베어링 중심 좌표계 $O-Y-Z$ 에 대한 로우터 표면상의 각 점의 좌표는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} y_R(\varphi) &= e \cdot \cos \theta + r_0 \cdot \cos \xi + r(\varphi) \cdot \cos \varphi \\ z_R(\varphi) &= e \cdot \sin \theta + r_0 \cdot \sin \xi + r(\varphi) \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (17)$$

그러나 위 식에서 φ 값은 $O-Y-Z$ 에 대한 위치각 ϕ 값에 종속적인 변수이므로, Fig. 4에서와 같이 로우터 좌표계 $o-y-z$ 에서의 위치각 φ 와 베어링 좌표계 $O-Y-Z$ 에서의 위치각 ϕ 사이의 관계식으로부터 ϕ 의 변화에 따른 φ 의 변화식을 구하여야 한다.

$$\begin{aligned} z_R(\varphi) &= e \cdot \sin \theta + r_0 \cdot \sin \xi + r(\varphi) \cdot \sin \varphi \\ r(\varphi) \cdot \sin(\varphi - \phi) &= e \cdot \sin(\varphi - \theta) + r_0 \cdot \sin(\phi - \xi) \end{aligned} \quad (18)$$

따라서 로우터 좌표계에서의 위치각 φ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\varphi = \phi + \sin^{-1} \left[\frac{e}{r(\varphi)} \cdot \sin(\phi - \theta) + \frac{r_0}{r(\varphi)} \cdot \sin(\phi - \xi) \right] \quad (19)$$

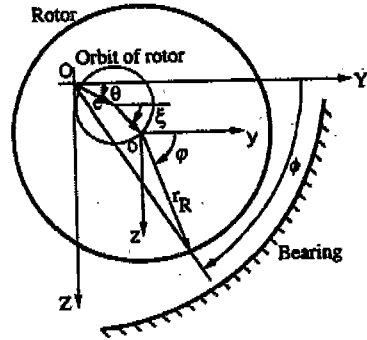


Fig. 4 Orbits of the geometric center of rotor

위 식은 양 변에 φ 가 있는 비선형 방정식이므로 연속 근사법을 사용하여 다음과 같이 근사한다.

$$\varphi_n = \phi + \sin^{-1} \left[\frac{e}{r(\varphi_{n-1})} \cdot \sin(\phi - \theta) + \frac{r_0}{r(\varphi_{n-1})} \cdot \sin(\phi - \xi) \right] \quad (20)$$

$r(\varphi) \approx r_R$ 이므로 연속근사의 초기값으로는 r_R 을 사용하며, 이전 값과의 오차가 10^{-10} 이하로 감소하는 경우를 수렴값으로 보았다. 이를 이용하여 베어링 좌표계에서의 ϕ 의 변화에 따른 로우터 표면상의 각 점의 위치 $y_n(\varphi_n)$, $z_n(\varphi_n)$ 를 구할 수 있다. 이 값으로부터 베어링의 회전각 ϕ 의 변화에 따른 각 위치에서의 간극함수 $h(\phi)$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} h(\phi) &= [(r_B \cos(\phi) - y_R(\varphi_n))^2 \\ &\quad + (r_B \sin(\phi) - z_R(\varphi_n))^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (21)$$

이 때, $\phi = 0^\circ, 90^\circ$ 에 설치된 프루브형 센서의 변위 측정신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y &= g_0 - h(\phi = 0^\circ) \\ z &= g_0 - h(\phi = 90^\circ) \end{aligned} \quad (22)$$

실린더형 캐패시턴스 센서의 경우는 (14)와 (15) 식을 사용하는데, 임의의 자세각과 형상 불균일을 갖는 로우터와 센서판 사이의 거리는 센서의 각 위치에서 서로 다르므로 센서판을 200개의 차분요소로 나누어 각 요소에서의 측정 전압을 계산하여 이를 평균한다.

$$V_T = \frac{1}{200} \cdot \sum_{\phi=\phi_{T1}}^{\phi_{T2}} (4 - 6 \cdot e^{-\frac{h(\phi) \cdot T}{\kappa \epsilon_0 A_s \times 10^6}}) \quad (23)$$

$$V_B = \frac{1}{200} \cdot \sum_{\phi=\phi_{B1}}^{\phi_{B2}} (4 - 6 \cdot e^{-\frac{h(\phi) \cdot T}{\kappa \epsilon_0 A_s \times 10^6}})$$

$$V_L = \frac{1}{200} \cdot \sum_{\phi=\phi_{L1}}^{\phi_{L2}} (4 - 6 \cdot e^{-\frac{h(\phi) \cdot T}{\kappa \epsilon_0 A_s \times 10^6}})$$

$$V_R = \frac{1}{200} \cdot \sum_{\phi=\phi_{R1}}^{\phi_{R2}} (4 - 6 \cdot e^{-\frac{h(\phi) \cdot T}{\kappa \epsilon_0 A_s \times 10^6}})$$

따라서, 로우터의 중심의 좌표는 다음과 같다.

$$y = (V_L - V_R) / S_{yy} \quad (24)$$

$$z = (V_T - V_B) / S_{zz}$$

이 때, S_{yy} , S_{zz} [V/mm]는 캐패시턴스 센서의 변위민감도이다.

4. 로우터의 회전궤적

일정한 편심량, 자세각 및 회전반경을 가지고 회전하는 로우터에 대한 변위 센서들의 측정특성을 비교 고찰하기 위하여 세가지 종류의 측정시스템을 모델링하였다. 프루브형 센서는 각각 $\phi = 0^\circ, \pm 90^\circ, 180^\circ$ 의 네 위치에 장착되며, $\phi = 0^\circ, -90^\circ$ 에 위치한 두개의 프루브형 센서 모델로만 변위 측정특성을 해석한 경우와 네개의 프루브형 센서 모델로 변위 측정특성을 해석한 결과를 실린더형 캐패시턴스 센서 모델의 측정특성 해석결과와 비교하였다. 여기서, 프루브형 센서는 센서 위치의 한 점에서의 로우터와 베어링 사이의 간극을 측정한다고 가정한다.

로우터의 가공상태 변화에 따른 각 센서들의 측정특성 차이를 고찰하기 위하여 Table 1과 같이 로우터의 가공오차와 표면조도의 조합에 대하여 측정궤적 해석을 수행하였다.

모든 경우에 대하여 편심량은 10 μm , 자세각은 45° 그리고 회전반경은 20 μm 로 설정하였다. 가공오차는 로우터의 표면상에 정현함수적으로 나타나며, 그 진폭은 10 μm 라고 가정하였다. 표면조도는 로우터의 가공오차에 중첩되어 나타나며, 그 진폭은 3 μm 라고 가정하였다. 로우터의 가공오차에 의한 측정특성의 변화는 가공오차 주기에 따라 Fig. 5에서 Fig. 9까지에 도시되어 있으며, 가공오차와 표면조도가 중첩되어 나타난 경우

Table 1 Analysis data of the rotor

Case	Eccentricity [μm]	Attit. Angle [deg]	Orbit Radius [μm]	Wave. No.	Wave Amp. [μm]	Rough. No.	Rough. Amp. [μm]
1	10	45	20	0	0	0	0
2	10	45	20	2	10	0	0
3	10	45	20	3	10	0	0
4	10	45	20	4	10	0	0
5	10	45	20	5	10	0	0
6	10	45	20	2	10	53	3

에 대해서는 Fig. 10에 도시되어 있다. 각각의 그림에서 좌측 상단은 해석에 사용된 로우터의 형상과 로우터 기하학적 중심의 궤적을 도시하고 있다. 이 때 로우터의 가공오차 및 표면조도는 각각 100 배로 과장되어 그려져 있다. 나머지 세 개의 그림은 각 센서들의 로우터 궤적 해석 결과를 도시하며, 비교를 위하여 로우터 기하학적 중심의 궤적을 기준값으로 그려 놓았다. 우측 상단의 그림은 두개의 프루브형 센서 모델이 0° 및 -90° 에 배치된 경우의 두 센서에 의한 로우터 변위의 해석결과를 도시한다. 좌측 하단의 그림은 네 개의 프루브형 센서 모델이 90° 간격으로 배치되어 서로 마주보는 센서간의 측정결과를 차동종폭한 경우의 해석결과를 도시한다. 우측 하단의 그림은 실린더형 캐패시턴스 센서의 해석결과를 도시한 그림이다.

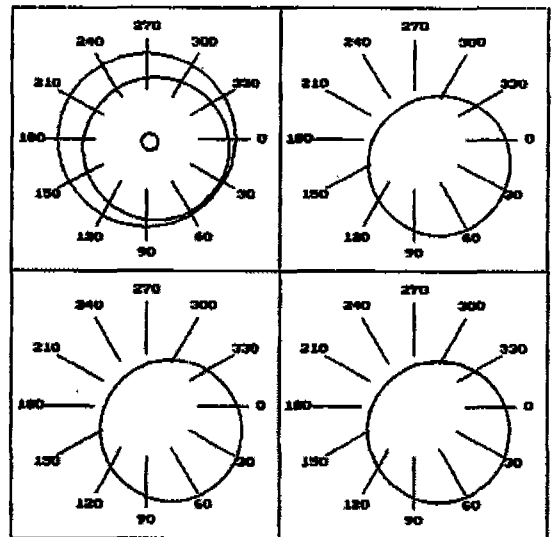


Fig. 5 Orbits for circular rotor

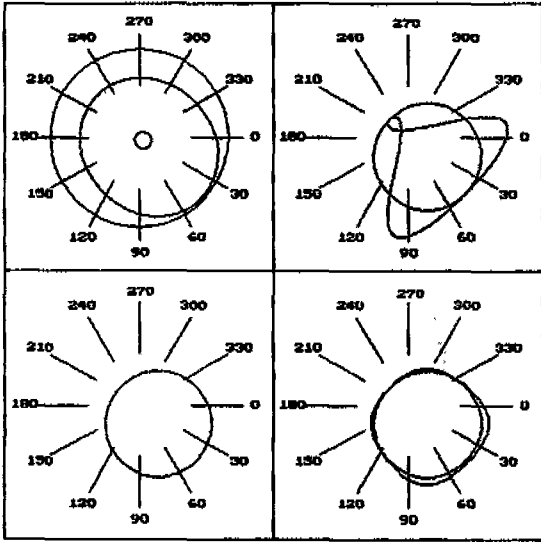


Fig. 6 Orbits for elliptic rotor

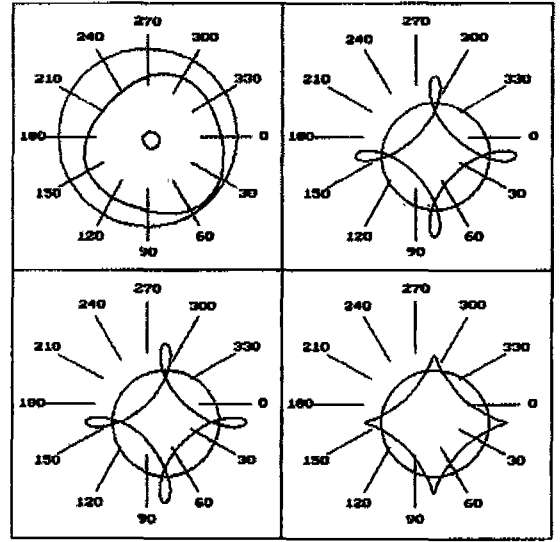


Fig. 7 Orbits for triangular rotor

Fig. 5는 로우터에 가공형상 불균일이나 표면조도가 존재하지 않는 진원형 로우터의 경우로서 세가지 센서가 모두 로우터 기하학적 중심의 위치변화를 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 로우터에 2주기의 가공형상 불균일이 존재하는 경우를 도시하고 있다. 두개의 프루브형 센서 모델로 궤적을 해석한 경우는 궤적이 한번 꼬이는 현상을 나타내며, 네 개의 프루브형 센서 모델로 해석한 경우는 로우터의 궤적을 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다. 실린더형 캐패시턴스 센서의 경우도 네 개의 센서로 변위를 측정하는 형태이므로, 로우터의 궤적을 큰 오차없이 예측할 수 있으며, 이 경우, 판형 캐패시턴스 센서의 평균효과에 기인한 궤적측정상의 장점을 확인할 수는 없다.

Fig. 7은 로우터에 3주기의 가공형상 불균일이 존재하는 경우를 도시하고 있다. 프루브형 변위 센서 모델로 해석한 경우는 두개 및 네개의 센서를 사용한 경우 모두 꼬인 사각형 형태로 궤적이 나타난다. 이는 90° 간격으로 센서를 배열하였기 때문에 나타나는 현상으로, 센서의 직각 배치는 로우터의 가공형상 불균일이 상하 및 좌우로 비대칭적인 경우에 대하여 매우 취약한 측정특성을 보임을 알 수 있다. 실린더형 캐패시턴스 센서의 경우도 이와 유사한 경향을 보이지만 센서 자체의 평균효과에 기인하여 궤적의 꼬임현상은 나타나지 않는다.

Fig. 8은 로우터에 4주기의 가공형상 불균일이 존재하는 경우를 도시하고 있다. 두개의 프루브형 변위 센서를 사용한 경우에는 로우터의 가공형상 오차에 기인하여 매우 심한 궤적의 왜곡형상을 보이는 반면 네개의 프루브형 변위 센서를 사용한 경우에는 로우터 기하학적 중심의 궤적을 정확하게 측정함을 알 수 있다. 이는 Fig. 7의 경우와 상반된 현상으로, 센서의 직각 배치는 로우터의 가공형상 불균일이 상하 및 좌우로 대칭적인 경우에 대하여 매우 정교한 측정특성을 보임을 알 수 있다. 실린더형 캐패시턴스 센서도 이와 동일한 결과를 도시하고 있다.

Fig. 9는 로우터에 5주기의 가공형상 불균일이 존재하는 경우를 도시하고 있다. 두개 및 네개의 프루브형 변위센서의 경우 모두 4주기의 꼬임궤적을 보이고 있다. 이는 Fig. 7에서 설명한 바와 같이 로우터의 비대칭적인 형상에 대한 측정상의 취약성에 기인한다. 이에 반하여 실린더형 캐패시턴스 센서는 센서 자체의 평균효과에 기인하여 로우터의 회전궤적을 매우 완만하게 변하는 사각형의 형태로 측정하며, 실제 궤적과의 차이도 매우 미소함을 알 수 있다. 5주기 이상의 가공형상 불균일의 경우, 외전류 구동형 변위 센서는 로우터의 불균일 주기에 따라 측정특성이 매우 심하게 변화하는 반면, 실린더형 캐패시턴스 센서의 경우에는 거의 영향을 받지 않는다.

Fig. 10은 로우터에 2주기의 가공형상 불균일과 53

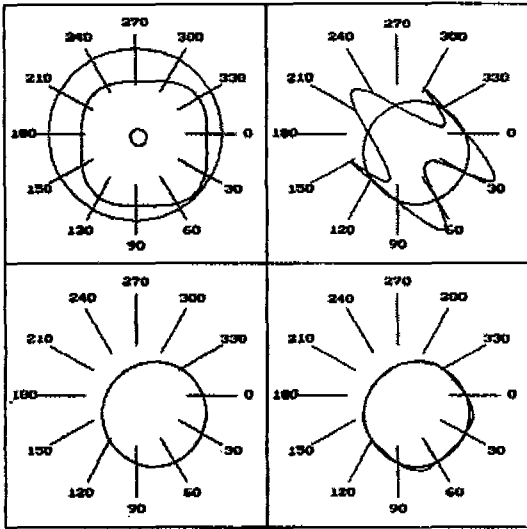


Fig. 8 Orbits for rectangular rotor

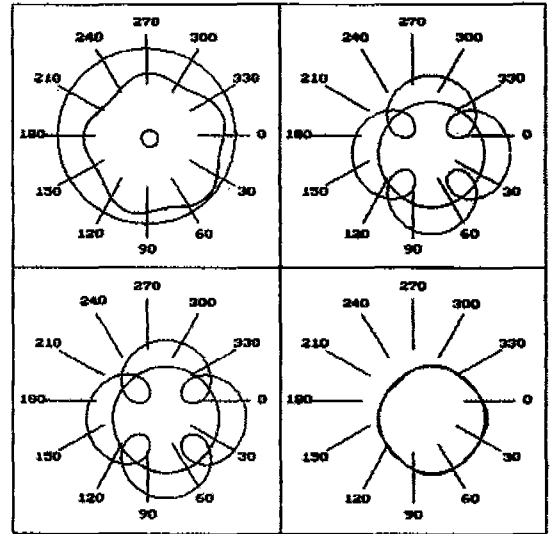


Fig. 9 Orbits for pentagonal rotor

주기의 표면조도가 중첩되어 존재하는 경우에 대하여 도시하고 있다. 표면 조도에 따른 측정오차를 제외하면 Fig. 6과 동일한 결과를 나타내며, 프루브형 변위 센서의 경우에는 센서의 개수에 관계없이 로우터 표면상에 존재하는 표면조도에 의한 영향을 제거할 수 없음을 알 수 있다. 이에 반하여 실린더형 캐패시턴스 센서의 경우에는 로우터 표면상에 존재하는 표면조도에는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5~Fig. 10을 통하여 두개 및 네개의 프루브형 센서가 직각으로 배치된 경우와 실린더형 캐패시턴스 센서에 대하여 가공형상 불균일과 표면조도가 존재하는 로우터에 대한 회전궤적 측정특성의 차이를 해석적으로 고찰하였다. 이에 따르면, 두개의 프루브형 변위 센서로 로우터의 회전궤적을 측정하는 경우는 로우터 기하학적 중심의 위치변화와 더불어 로우터의 가공형상 불균일이나 표면조도를 측정하기 때문에 로우터 궤적에 심한 왜곡이 발생하며, 이를 그대로 자기 베어링의 제어신호로 사용하면, 자기 베어링의 제어에 심각한 장애요인이 될 것으로 예상된다. 네개의 프루브형 변위 센서 모델을 이용하여 로우터의 회전궤적을 해석한 결과를 살펴보면, 대칭적인 가공형상 불균일을 갖는 로우터의 회전궤적 측정에는 탁월한 특성을 보이는 반면, 비대칭적인 가공형상 불균일에 대해서는 두개의 변위센서 모델로 해석한 결과와 동일한 형태를 보임을 알 수 있다. 그러나 실제로 가공된 로우터의 경우, 가공형

상 불균일이 대칭적으로 나타나기 어려우므로, 네개의 프루브형 변위 센서를 사용한다 하여도 로우터의 가공형상 불균일의 영향을 제거하기는 어려움을 예측할 수 있다. 또한 어떠한 경우에도 프루브형 변위 센서는 로우터의 표면조도에 따른 영향을 제거할 수 없음을 알 수 있다. 실린더형 캐패시턴스 센서는 평균효과에 기인하여 로우터의 표면조도는 궤적측정에 거의 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. 실린더형 캐패시턴스 센서는

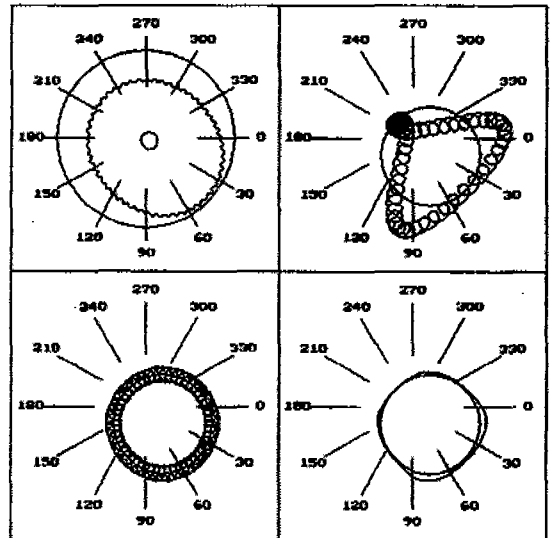


Fig. 10 Elliptic rotor with surface roughness

4개의 센서판이 상, 하, 좌, 우에 배치된 형태이므로, 3 주기의 로우터 가공형상 불균일에 대해서는 매우 취약한 측정특성을 보인다. 그러나, 센서의 평균효과에 기인하여 4주기 이상의 가공형상 불균일에 대해서는 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 로우터의 표면에 존재하는 오차인 가공형상 오차 및 표면조도가 실린더형 캐패시턴스 센서의 로우터 회전축 측정치에 끼치는 영향에 대하여 이론적으로 고찰해 보았다. 변위 측정특성의 비교를 위하여 두개 및 네개의 프루브형 변위 센서가 직각으로 배치된 경우에 대한 측정특성도 해석적으로 검증하였다. 이에 따르면, 센서의 직각 배치는 홀수 주기의 가공형상 불균일을 갖는 로우터의 회전축 측정치에 매우 취약한 특성을 보임을 알 수 있었다. 실린더형 캐패시턴스 센서의 경우, 3주기의 가공형상 불균일에 대해서는 매우 왜곡된 궤적을 보이지만 4주기 이상의 가공형상 불균일에 대해서는 센서 자체의 평균효과에 기인하여 매우 성공적으로 로우터의 회전축을 측정할 수 있음을 검증하였다. 프루브형 변위 센서의 경우, 로우터의 표면조도를 그대로 측정하는 반면, 실린더형 캐패시턴스 센서의 경우에는 거의 영향을 받지 않음을 검증할 수 있었다.

6. 후 기

본 연구는 한국과학재단지원 터보동력기계연구센터 연구활동과 선도기술개발사업인 첨단 생산시스템 개발

연구 일환으로 이루어진 것입니다.

References

1. P.E. Allaire, R.R. Humphris, "Dynamics of a Flexible Rotor in Magnetic Bearings", 4'th Workshop on Rotor Dynamics Instability Problems in High Speed Turbomachinery, Texas A & M Univ. June, 1986.
2. E.H. Maslen, J.R. Bielk, "A Stability Model for Flexible Rotors with Magnetic Bearings", Trans. ASME. J. of Dynamic Systems Measurement and Controls, April, 1991.
3. P.D. Chapman, "A Capacitive Based Ultra-precision Spindle Error Analyzer", J. of Precision Engineering, Vol.7, No.3, July, 1985.
4. A.O. Salazar, W. Dumford, R. Stephen, E. Watanabe, "A Magnetic Bearing System using Capacitive Sensors for Position Measurement", IEEE Trans. on Mag, Vol.26 No.5 Sep. 1990.
5. 장인배, "판형 캐패시턴스 센서가 내장된 자기 베어링의 작동성능 향상에 관한 연구", 서울대학교 박사학위 논문, 1994.
6. D. Haliday, R. Resnick, "Fundamentals of Physics", John Wiley & Sons Inc. 1988.