

〈論 文〉

캐패시턴스형 센서가 내장된 자기베어링 시스템의 작동성능에 관한 연구

장인배* · 한동철**

(1994년 10월 8일 접수)

Performance of Built-in Capacitance Type Transducer of a Magnetic Bearing System

In-Bae Chang and Dong-Chul Han

Key Words : Magnetic Bearing (자기베어링), Capacitance Sensor (캐패시턴스 센서), Performance Test (성능시험)

Abstract

In this paper, we designed and fabricated the magnetic bearings and built-in type cylindrical capacitive transducers for improving the vibration characteristics of rotating shaft. The eddy current and magnetic field from the electromagnet of the bearing don't affect the measuring signal of the capacitive type transducers so that it is possible to locate the capacitive sensor plates around the magnetic bearing poles and can improve the spillover problem which is induced by the noncollocation of the sensors and actuators. According to the sensitivity calibration schemes using a X-Y table, the cylindrical capacitive transducers have a good linearities in the $\pm 70 \mu\text{m}$ range from the geometric center of the sensor plates. The measured results also show high displacement sensitivities of the sensors. According to the performance test of the magnetic bearing which is controlled by the analog PD controllers, we found that the built-in capacitive transducer system successfully measures the journal displacement in the magnetic field and therefore the magnetic bearing system supports the rotating shaft up to 12,000 rpm.

———— 기 호 설 명 ————

A : 센서의 단면적 [m^2]

C : 캐패시턴스 [F]

d : 판 사이의 거리 [m]

q : 전하 [C]

R : 저항 [Ω]

S : 변위 민감도 [V/mm]

t : 시간 [sec]

V : 전압 [V]

i : 전류 [A]

ϵ_0 : Termittivity 상수 [C^2/Nm^2]

κ : 유전율상수

1. 서 론

견인식 자기베어링은 귀환제어를 수행하지 않으면 불안정해지는 시스템이다. 그러므로 대부분의 자기베어링 시스템은 귀환제어 루프를 형성하기 위하여 제어 대상물의 변위를 측정하는 비접촉 변위

*정회원, 강원대학교 정밀기계공학과

**정회원, 서울대학교 기계설계학과

측정 시스템이 필요하다. 광학, 레이저, 와전류, 홀 및 캐패시턴스 등과 같은 다양한 측정방식의 센서들이 자기베어링에 응용되고 있으나, 변위 민감도, 설치공간, 자장의 영향, 응답속도 및 측정속도 등의 요인이 고려되어야만 한다. 또한 자기베어링의 하나의 제어축을 제어하기 위해서는 최소한 하나 이상의 변위측정 시스템이 필요하게 되므로 자기베어링의 실용화를 위해서는 변위센서의 가격도 무시할 수 없는 요인이 된다.

자기베어링 시스템 분야에서는 최근 들어 다양한 종류의 주제가 연구되어 왔다. Humphris 등⁽¹⁾은 자기베어링의 안정성을 향상시키기 위하여 두 개의 제어 알고리즘의 함수에 대하여 자기 저널베어링의 강성 및 감쇠 특성을 비교하였다. Kasarda⁽²⁾는 자기패퍼를 사용하여 연성축의 진동 감소를 시도하였다. 이승원 등⁽³⁾은 PD제어 알고리즘을 사용한 자기베어링-회전축 시스템의 동특성을 고찰하였으며 김중원⁽⁴⁾은 중앙집중식 서보기를 사용한 자기베어링의 능동제어를 고찰하였다. Lee와 Kim⁽⁵⁾은 과도 및 정상상태에서의 스펙오버(spillover) 현상에 대한 안정성을 향상시키기 위하여 아 최적(suboptimal) 출력 귀환제어기를 제시하였다. 그러나 자기베어링 시스템은 측정위치와 작동기의 위치가 일치하지 않기 때문에 안정화에 많은 어려움이 있다. Salm과 Schweitzer⁽⁶⁾는 센서와 작동기의 위치가 일치한 경우에 대하여 스펙오버현상을 안정화시키기 위하여 축차(reduced order)모델을 제안하였다. Salazar 등⁽⁷⁾은 판형 캐패시턴스 센서를 자기베어링에 적용시켜 스텝입력에 대한 실험결과를 해석결과와 비교하였다. Chapman⁽⁸⁾은 초정밀 주축의 회전오차를 측정하기 위하여 다중 캐패시턴스 센서를 사용하였다. 캐패시턴스형 센서에 대해서는 다양한 연구⁽⁹⁻¹¹⁾가 수행되었지만 센서의 형식이나 측정방식 등에서 Chapman의 모델이 자기베어링에 적용시키기 가장 용이하다.

본 논문에서는 자기베어링에 내장되는 실린더형 캐패시턴스 센서 시스템을 제시한다. 캐패시턴스형 변위측정 시스템은 자기베어링으로부터 발생된 자장의 영향을 받지 않아 자극에 근접하여 설치할 수 있으므로 측정기와 작동기 간의 위치 불일치문제를 최소화시킬 수 있다. 또한, 비교적 넓은 면적의 센서판과 대상물 사이에 형성된 캐패시턴스 양으로부터 대상물과의 거리를 측정하므로, 표면조도나 진원도오차 등과 같은 회전축의 가공형상오차에 기인

한 측정오차를 최소화시킬 수 있다. 그리고, 변위 센서가 자기베어링에 내장되어 있으므로 매우 많은 시간이 소요되는 센서의 설치작업을 간소화시킬 수 있다. 본 논문에서 제시된 캐패시턴스 센서 내장형 자기베어링 시스템의 유용성을 검증하기 위하여 자기베어링에 지지된 회전축의 회전속도의 변화에 따른 제적의 변화양상을 고찰하였다.

2. 캐패시턴스형 변위센서

2.1 센서 증폭기

본 논문에서는 자기베어링의 지지를 받으며 회전하는 회전축의 변위를 측정하기 위한 비접촉 변위 센서로 비교적 넓은 면적의 센서판과 회전축 사이에 주어진 전위차에 의하여 생성된 캐패시턴스 양으로부터 양자간의 거리를 측정하는 판형 캐패시턴스센서를 도입하였다. 서로 마주보는 두개의 평행판 사이에 형성된 캐패시턴스 양은 양자간의 거리에 반비례하므로 이를 전압신호로 변환하여 추출하면 센서판과 회전축 사이의 간극의 변화를 측정할 수 있다.

센서 판과 자기베어링 저널 사이의 간극에 형성된 캐패시턴스 양으로부터 간극의 변화를 측정하기 위해서는 두 요소간에 형성되는 캐패시터에 일정시간 동안 전하를 충전시키는 충전과정과 전하를 비우는 방전과정을 동일한 시간간격으로 반복해야 한다. 충전이 시작된 후 일정시간이 지나면 센서판과 저널 사이의 전위차를 추출하여 다음번 추출과정이 수행되기 전까지 이를 저장하여야 한다. 이를 구현하기 위해서는 각 센서들의 충전 및 방전과 추출과정을 일정한 시간간격으로 제어하기 위한 구동회로와 이에 의하여 제어되는 전기적인 접속요소가 필요하다. 본 논문에서 충전시간 80 μ s, 방전시간 20 μ s으로 100 μ s 주기로 충전 및 방전과정을 반복하며 방전이 시작되기 직전에 추출이 수행되도록 구동회로를 설계하였다. 자기베어링에 내장된 4개의 변위센서는 동일한 구동회로의 제어를 받는다.

캐패시턴스-전압 변환회로(C/V)는 Chapman⁽⁸⁾과 동일한 모델을 사용하였으며 Fig. 1에 도시되어 있다. 센서부는 센서판과 가드 판으로 구성되며 가드는 센서판을 둘러싸고 있는 형상이다. 변위측정 신호의 신뢰도를 높이기 위하여 동일 제어축 상의 서로 마주보는 두 센서의 출력전압에 대한 차동 증폭을 수행한다. 이에 따라 센서의 선형영역이 확대되

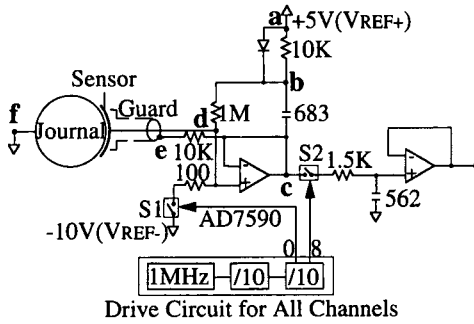


Fig. 1 Capacitance to voltage conversion circuit

며 항상 자기베어링 내의 원점에 대한 저널의 상대적인 변위를 정확히 측정할 수 있다.

2.2 변위 민감도해석

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

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

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

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

그러므로 식(2)를 이용하여 식(1)을 전위차 V 의 함수로 나타내면 다음과 같다.

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

식(3)에 따르면 센서 판의 면적이 일정하다면 서로 마주보는 두 판 사이에 형성된 캐패시터가 포화되기 전까지는 전위차 V 는 충전시간 T 와 전류 i 및 판 사이의 거리 d 에 비례함을 알 수 있다. 그러므로, 충전시간 T 및 전류 i 가 일정한 캐패시턴스-전압 변환회로를 사용하여 센서 판과 대상물 사이의 거리를 측정하는 비접촉 변위 측정시스템을 구성할 수 있다. 그런데, 실제의 경우, 캐패시터내에 충전되는 전하는 식(2)와는 달리 지수함수적인 특성을 가지고 있으므로 전위차 V 는 서로 마주보는 두 판사이에 거리에 대하여 심한 비선형적인 특성을 갖는다. 센서 판에 충전되는 전하의 양으로부터 전위차 V 와 판 사이의 거리 d 사이의 상관관계를

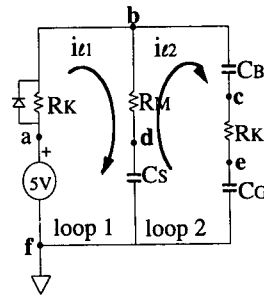


Fig. 2 Idealized circuit of the capacitive to voltage conversion circuit at S1 is opened

도출하기 위해서는 Fig. 1에서 스위치 S1이 닫힌 경우에 대하여 Fig. 2에서와 같이 회로를 이상화시킨 후, 전압 추출단에서의 전압을 Kirchhoff의 전압평형의 법칙과 페로해석법(loop analysis)을 사용하여 해석하여야만 한다.

Fig. 2에서 C_s 는 센서 판에 형성된 캐패시턴스이며, C_c 는 가드에 형성된 캐패시턴스 그리고 C_b 는 부트스트랩 캐패시터의 용량을 의미한다. 회로 내에는 두개의 페로가 형성되며 Fig. 2에서와 같이 시계방향으로 흐른다고 가정한다. 이에 따라 다음과 같은 두 개의 페로방정식이 구성된다.

Loop 1:

$$R_m(i_1 - i_2) + \frac{1}{C_s} \int (i_1 - i_2) dt = 5 \tag{4}$$

Loop 2:

$$R_m(i_1 - i_2) + \frac{1}{C_s} \int (i_1 - i_2) dt + \frac{1}{C_b} \int i_2 dt + R_k \cdot i_2 + \frac{1}{C_g} \int i_2 dt = 0 \tag{5}$$

Fig. 2에 따르면 OP 앰프의 작동원리상 c 점에서의 전압은 d 점에서의 전압과 동일하므로 C/V 회로에서의 출력단 전압 $V_c(t) = V_d(t)$ 이며 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$V_d(t) = \frac{1}{C_s} \int (i_1 - i_2) dt \tag{6}$$

Fig. 2에서 스위치 S1이 열리는 순간의 전압은 $V_d(t=0) = -10[V]$ 이므로 이를 초기조건으로 하여 V_d 를 구한 후 본 논문에서 모델링된 바와 같이 $R_k = 10^4[\Omega]$, $R_m = 10^6[\Omega]$, $C_b = 0.068[\mu F]$ 을 대입하면 식(7)과 같이 V_d 를 구할 수 있다.

$$V_d(t) = 5 - 15 \cdot e^{-\frac{t}{C_s \times 10^6}} \tag{7}$$

C/V 변환회로에서의 전압추출은 충전이 시작된 $T = 80 \mu s$ 후에 수행되므로 식(1)을 사용하여 식(7)을 센서판과 측정대상물 사이의 거리 d 와 충전시간 T 의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$V_a(T) = 5 - 15 \cdot e^{-\frac{d \cdot T}{\kappa \times \epsilon_0 \times A_s \times 10^8}} \quad (8)$$

이때, κ 는 보정계수이며 A_s 는 센서판의 면적이다. 증폭회로의 비선형성과 출력회로에서의 전압강하 등에 기인하여 C/V 회로의 출력전압은 V_a 보다 작게 나타나므로 다음 절에서의 실험결과를 고려하여 식(8)을 다음과 같이 수정하였다.

$$V_{out,theory} = 0.8 \times V_a(T) \\ = 4 - 12 \cdot e^{-4.519 \times 10^4 \cdot (d/\kappa)} \quad (9)$$

2.3 변위민감도의 측정

판형 캐패시턴스 센서의 변위민감도는 간극에 대하여 지수함수적 특성을 가지고 있다. 이러한 측정 특성을 실험적으로 규명하기 위하여 Fig. 3에서와 같이 황동으로 제작된 하나의 평면형 센서와 도전성 측정대상물 사이의 간격을 마이크로미터를 사용하여 변화시키면서 C/V 회로로부터의 출력전압을 측정하였다. 센서판의 면적 $A_s = 204 \times 10^{-6} [m^2]$ 이며 센서의 변위민감도 측정결과는 간극의 변화에 따른

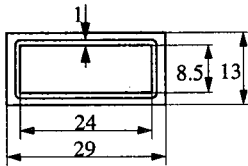


Fig. 3 Dimensions of capacitive sensor plate

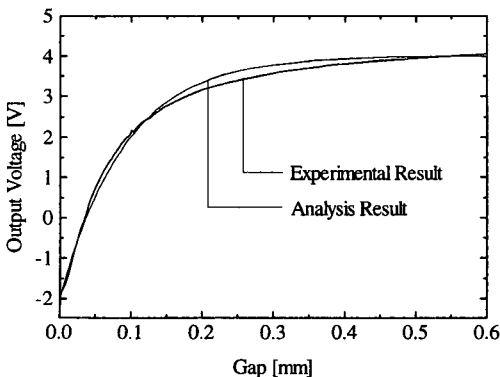


Fig. 4 Displacement sensitivity of the plate type capacitive transducer

출력전압(V_m)의 변화의 형태로 Fig. 4에 도시되어 있다. 이에 따르면 판형 캐패시턴스센서의 변위민감도는 0.15 mm를 전후로 급격하게 변하며 0.15 mm 이하의 간극에서는 약 40 V/mm의 변위민감도를 그리고 0.15 mm 이상의 간극에서는 약 1 V/mm의 변위민감도를 보임을 알 수 있다.

실험결과를 앞서의 식(15)과 비교하면 많은 차이를 나타냄을 알 수 있다. 실험장치의 초기 장착시 서로 마주보는 두 면의 평행도를 정확히 맞추지 못하여 0.05 mm 이하에서의 급격한 전압변화를 정확히 측정하지 못하여 지수함수의 상수항이 차이가 나며, 누전을 방지하기 위하여 센서 표면을 에나멜로 코팅한 결과 유전율상수가 변화하여 지수함수의 차수가 차이를 나타낸다. 그러므로, 실험결과를 고려하여 식(9)의 지수함수의 상수항을 6으로 보정하며, $\kappa = 4.07$ 로 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{out,corrected} = 4 - 6 \cdot e^{-(1.11 \times 10^4 \cdot d)} \quad (10)$$

Fig. 4에 도시된 해석결과는 식(10)을 사용한 것으로 실험결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

3. 실린더형 캐패시턴스 센서와 자기베어링

자기베어링에 내장되어 저널의 회전 변위를 측정하는 캐패시턴스 센서는 자기베어링의 풀 면에 근접하여 설치한다. 반경방향으로 4개의 센서판 및 가드가 음각 된 황동 실린더를 자기베어링 풀면 접촉시킨 후 자기베어링과 센서를 플라스틱으로 몰딩하여 Fig. 5와 같이 내경을 가공하여 완성한다. 이에 따라 센서판은 자기베어링의 반경 방향으로 8개

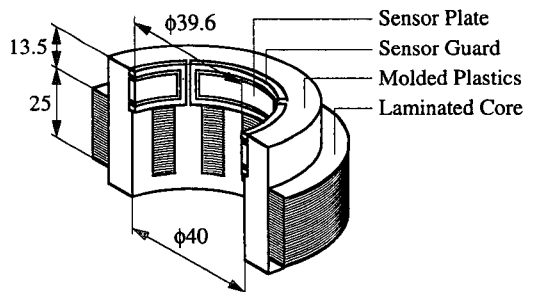


Fig. 5 Perspective view of the magnetic bearing and sensor plates

의 요소를 갖는 4개의 센서를 형성한다. 사각형의 판은 센서이며 판 주위를 둘러싸고 있는 4각형의 링은 가드이다. 서로 마주보는 두개의 센서는 동일한 제어축 상의 저널 회전변위를 측정하며 이들은 서로 차동 증폭되어 제어기의 입력변위로 사용된다. 실험에 사용된 저널의 직경은 39 mm이므로 자기베어링의 극과 저널 사이의 반경방향 간극은 0.5 mm이며 센서 판과 저널 사이의 반경방향 간극은 0.3 mm이다.

자기베어링은 원주방향으로 4개의 말굽형 전자석이 배치된 형태로 0.5 mm 두께의 규소 강판을 적층시켜 제작하였으며 내경 40 mm, 외경 81 mm, 두께 25 mm의 크기를 갖는다. 폴의 폭은 8 mm이며 두개의 폴이 하나의 말굽형 전자석을 형성하므로 저널과 마주하는 폴의 면적은 $2 \times 200 \text{ mm}^2$ 이다. 전자석 코일은 직경 0.35 mm인 에나멜 피복 동선을 270회 감았으며 두개의 코일이 연결되어 하나의 말굽형 전자석을 형성한다.

4. 변위민감도의 측정

자기베어링 내면에 반경방향으로 장착된 4 개의 변위센서는 Fig. 4에서와 같은 비선형적인 변위민감도 특성을 갖고 있을 뿐만 아니라 반경방향으로의 배치형태에 기인하여 어느 한 방향으로의 저널 변위가 그와 직각된 방향의 센서에 영향을 끼친다. 그러므로 본 절에서는 센서의 각 방향으로의 변위민감도와 직각된 방향으로의 변위에 기인한 측정값의 변화인 연계민감도에 대한 측정을 수행하였다.

Fig. 6은 자기베어링에 장착된 실린더형 캐패시턴스 센서의 변위민감도를 측정하기 위하여 구성한 민감도 측정장치를 도시하고 있다. 자기베어링-센서 조립체는 플랜지와 지지봉에 의하여 베드에 고정되며 저널은 마이크로미터로 이동되는 X-Y 테이블 위에 얹힌다. 마이크로미터를 사용하여 저널을 각 방향으로 $10 \mu\text{m}$ 단위로 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 의 범위에서 이동하면서 각 방향의 변위민감도(S_{xx} , S_{yy}) 및 연계민감도(S_{xy} , S_{yx})를 측정하였다. Fig. 7에는 측정된 변위민감도를 도시하고 있다. 수평(X) 및 수직(Y)방향 센서들의 선형영역은 자기 베어링의 중심으로부터 각 방향으로 $70 \mu\text{m}$ 정도이며 수평방향으로의 변위민감도 $S_{xx}=2.364 \text{ V/mm}$ 이고 수직방향으로의 변위민감도 $S_{yy}=2.300 \text{ V/mm}$ 이다. 또

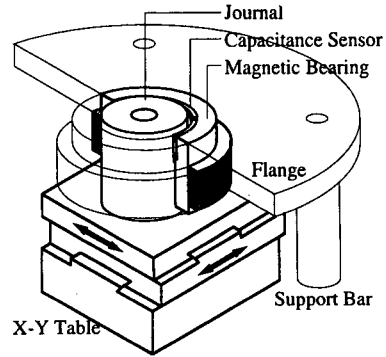


Fig. 6 Cylindrical capacitive transducer calibration system

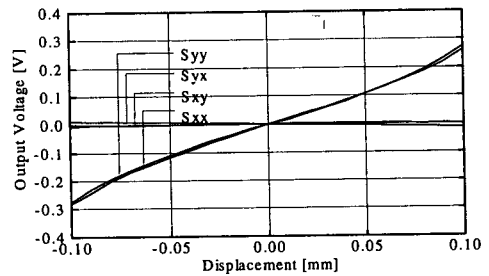


Fig. 7 Sensitivities of cylindrical capacitive transducers

한 선형영역을 넘은 범위에서의 변위 민감도는 선형영역에서보다 증가함을 알 수 있다. 그리고 각 센서들의 연계민감도는 Fig. 7에서와 같이 매우 작은 값을 가지므로 이를 무시할 수 있다.

5. 자기베어링 제어기

본 논문에서 자기베어링을 구동하기 위하여 사용된 제어기는 일반적인 아날로그 PD 제어기로, Fig. 8과 같이 하나의 제어축 상에 위치한 서로 마

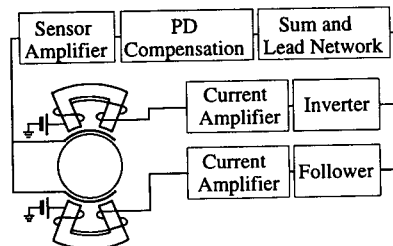


Fig. 8 Schematics of the magnetic bearing system

Table 1 Constants for analog PD controllers

τ_1	10^{-4}	K_T	3.332
τ_2	2×10^{-3}	K_P	5
τ_3	5×10^{-4}	K_D	5
τ_4	1.67×10^{-4}	τ_5	5×10^{-5}

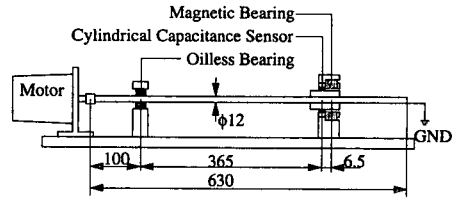


Fig. 9 Schematics of the magnetic bearing test rig

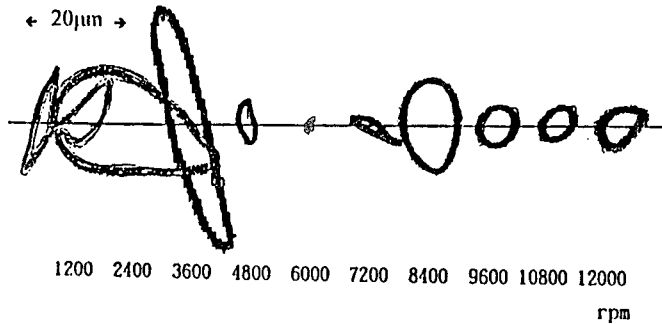


Fig. 10 Measured orbits of the rotor at magnetic bearing position

주보는 두개의 전자석 폴을 하나의 제어기로 구동한다. 신호처리방식은 Humphris⁽¹⁾의 모델과 유사하며 PD 연산, 합산 및 위상 보상회로가 포함된다. 제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{K_T}{\tau_s s + 1} \left[K_P + \frac{K_D \tau_2 s}{(\tau_1 s + 1)^2} \right] \left(\frac{s + 1/\tau_4}{s + 1/\tau_3} \right) \quad (11)$$

전달함수의 각 계수들은 Table 1에서와 같다.

6. 실험결과

캐패시턴스형 센서가 내장된 자기베어링의 작동성능을 검증하기 위하여 Fig. 9와 같이 회전축 실험장치를 구성하였다. 직경 12 mm, 길이 630 mm 인 회전축의 좌측은 무윤활 베어링으로 지지하며, 우측단은 본 논문에서 제작된 자기베어링으로 지지한 후 12,000 rpm까지 회전형태를 관찰하였다.

자기베어링 단에서의 측정된 회전 궤적은 Fig. 10에서와 같다. 저속에서는 베어링 간의 얼라인먼트나 베드지지상태 등과 같은 설치조건이 회전축의 진동형태에 영향을 끼칠 수 있으며 이에 따라 1,200 rpm에서와 같이 왜곡된 형태의 궤적이 나타난다. 회전속도가 증가함에 따라 설치조건에 의한 영향은 점차로 감소하며 자기베어링의 지지조건과 연성축의 진동특성이 회전궤적을 지배하게 된다.

회전궤적은 점차로 증가하여 3,000 rpm 근방에서 자기베어링의 지지강성에 기인한 공진점을 통과하며, 6,000 rpm 근처에서는 진폭이 최소로 감소한다. 회전궤적은 다시 점차로 증가하여 8,000 rpm 근방에서 회전축의 굽힘강성에 기인한 또 하나의 공진을 통과한다. 이 두개의 공진을 통과한 후 회전축의 진동은 12,000 rpm까지 안정적으로 유지된다.

본 논문에서 제시된 자기베어링 내장형 캐패시턴스센서는 자기베어링으로부터 발생된 자장의 영향을 받지 않고 성공적으로 회전축의 변위를 측정할 수 있을 뿐만 아니라 이를 자기베어링 제어기의 입력변위로 사용하여 회전축을 12,000 rpm 까지 성공적으로 지지할 수 있음을 검증하였다.

7. 결론

본 논문에서는 캐패시턴스형 변위센서가 내장된 자기베어링 시스템에 대한 설계, 제작 및 실험을 수행하였다. 단일 평면형 센서를 사용하여 캐패시턴스형 변위센서의 비선형적인 변위측정 특성을 검증하였으며, 자기베어링에 내장된 변위센서들의 민감도 측정을 통하여 각 방향 변위 센서들의 변위민감도와 연계민감도 특성을 측정한 결과, 각 방향으로 $\pm 70 \mu\text{m}$ 의 범위에서 약 2.3 V/mm의 변위 민

감도를 갖고 있으며, 센서와 직각된 방향으로의 변위에 기인한 각 방향센서들의 연계민감도 특성은 무시할 수 있음을 검증하였다. 자기베어링의 회전축 지지 특성을 12,000 rpm까지의 영역에서 검증한 결과 3,000 rpm 및 8,000 rpm 근처에서 각각 공진현상이 존재하며 그 이외의 영역에서는 매우 안정된 회전축 지지가 가능하였다.

본 논문에서 제시한 캐패시턴스 센서 내장형 자기베어링은 자장의 영향을 받지 않으며 회전축의 변위를 감도높게 측정하여 자기베어링을 구동할 수 있으므로, 고속 및 고정밀 회전이 요구되는 자기베어링 시스템에 성공적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 터보동력기계연구센터의 베어링 설계 연구와 G7과제인 고강성 고정밀 고속 주축 베어링 설계연구의 일환으로 이루어진 것입니다.

참고문헌

- (1) Humphris, R. R., Kelm, R. D., Lewis, D. W. and Allaire, P. E., 1986, "Effect of Control Algorithms on Magnetic Journal Bearing Properties," *Trans. ASME J. of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 108, No. 4, pp. 624~632.
- (2) Kasarda, M. E. F., Allaire, P. E., Humphris, R. R. and Barrett, L. E., 1990, "A Magnetic Damper for First-Mode Vibration Reduction in Multimass Flexible Rotors," *Trans. ASME J. of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 112, No. 4, pp. 463~469.
- (3) 이승원, 박철우, 이상조, 박영필, 1992, "능동 자기베어링의 설계와 실험적 동특성," 대한기계학회, '92년도 추계학술대회 논문집(I), pp. 679~682.
- (4) 김종원, 1992, "자기베어링 지지 로터계를 위한 건설한 중앙집중식 서보제어기 설계," 대한기계학회논문집, 제16권, 제6호, pp. 1141~1149.
- (5) Lee, C. W. and Kim, J. S., 1992, "Modal Testing and Suboptimal Vibration Control of Flexible Rotor Bearing System by Using a Magnetic Bearing," *Trans. ASME J. of Dynamic System Measurement and Control*, Vol. 114, No. 2, pp. 244~252.
- (6) Salm, J. and Schweitzer, G., 1984, *Modelling and Control of a Flexible Rotor with Magnetic Bearing*, C227/84, IMechE, pp. 553~559.
- (7) Salazar, A. O., Dunford, W., Stephan, R. and Watanabe, E., 1990, "A Magnetic Bearing System Using Capacitive Sensors for Position Measurement," *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 26, No. 5, pp. 2541~2543.
- (8) Chapman, P. D., 1985, "A Capacitance Based Ultra-Precision Spindle Error Analyser," *J. of Precision Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp.129~137.
- (9) Inglis, B. D., 1985, "Frequency Dependence of Electrode Surface Effects in Parallel-Plate Capacitors," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 24, No. 2.
- (10) Watanabe, K. and Chung, W. S., 1986, "A Switched Capacitor Interface for Intelligent Capacitive Transducers," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. IM-35, No. 4.
- (11) Kondo, K. and Watanabe, K., 1989, "A Switched Interface for Capacitive Sensors with Wide dynamic Range," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 38, No. 3.