

반경 방향 및 축 방향 운동 동시 측정을 위한 새로운 원통형 정전용량 변위센서

안형준(서울대 기계항공공학부), 김종혁*(서울대 기계항공공학부),
장동영(서울산업대 산업정보시스템공학과), 한동철(서울대 기계항공공학부)

A Novel Cylindrical Capacitive Sensor for both Radial and Axial Motion Measurements

H. J. Ahn(School of Mech. & Aero. Eng., SNU), J. H. Kim(School of Mech. & Aero. Eng., SNU),
D. Y. Jang(Dept. of Ind. & Info. Eng., SNUT), D. C. Han(School of Mech. & Aero. Eng., SNU)

ABSTRACT

This paper presents a novel cylindrical capacitive sensor (CCS) for both radial and axial motion measurements. Although the new CCS has almost the same geometric configuration as the conventional CCS, the unused axial area of the CCS is utilized to measure the axial motion of the rotor, which can afford more compact design and reduction of the system complexity. First, a theoretical model of the proposed CCS is derived. Based on the derived theoretical model, compensation methods to decouple the radial and axial motion measurements are proposed. In addition, error analysis is performed and a design rule is proposed to guarantee the same accuracy in measuring both radial and axial motions. Finally, a test rig and electronics for the proposed CCS are built and the effectiveness of the proposed CCS is verified with experiments and simulations.

Key Words : Cylindrical capacitive sensor (원통형 정전용량 변위센서), Radial and axial motion measurement (반경 및 축방향 운동 측정)

1. 서론

자기베어링(AMB) 및 하이브리드 베어링(hybrid bearing) 등과 같은 능동형 베어링으로 지지되는 주축 시스템에는 일반적으로 4 개의 반경방향 변위센서와 1 개의 축 방향 변위센서가 설치된다. 이러한 능동형 베어링을 요소로 하는 주축의 설계 시 반경 방향 및 축 방향 변위센서의 충분한 설치 공간이 필요하게 되며, 이는 설계 주축의 길이 증가를 유발하고 고유진동수 저하를 일으키는 요인이 된다. 또한, 축 방향 변위센서의 설치 위치는 주축의 성능에 중요한 역할을 하며, 설치 위치 선정에 특별한 주의를 기울여야 한다. 주축 시스템의 단순한 설계와 시스템의 동 특성 개선을 위하여 종종 원추형 변위센서가 이용되기도 한다. 그러나, 이러한 원추형 변위센서는 반경방향 변위 신호와 축 방향 변위신호 간의 간섭으로 인한 신호 측정의 어려움이

있고, 원추형 센서 자체의 형상으로 인해 센서의 설치와 보정이 어렵다.

주축 변위 측정에 가장 많이 이용되는 상용 프루브 형의 변위센서는 주축의 표면 품질에 큰 영향을 받는다. 따라서, 측정된 변위 신호로부터 주축 표면의 기하학적 오차로 인한 불필요한 신호를 제거하기 위한 별도의 신호처리 알고리즘이 필요하게 된다. 이러한 프루브 형상의 변위센서의 대안으로 원통형 정전용량 변위센서 (cylindrical capacitive sensor; CCS)가 개발, 적용되고 있으며, 이는 측정 면이 넓어 평균화 효과를 가지며 이로 인해 주축의 형상 오차에 둔감하고, 또한 수십 나노 미터에 해당하는 매우 높은 분해능을 갖는다^[1,2].

본 논문은 반경 및 축 방향 변위를 측정하기 위한 새로운 원통형 정전용량 센서를 제안한다. 새로운 센서의 이론적 해석을 위한 모델을 유도하였으며, 유도된 모델을 기반으로 반경방향 신호와 축

방향 신호를 분리할 수 있는 보상 기법을 제안하였다. 또한 제안된 센서의 오차 분석을 수행하여 반경 및 축 방향 모두 같은 정확성을 갖도록 하기 위한 설계 법을 제안하였다. 개발된 센서를 구동하기 위한 회로와 실험 장치를 제작하였으며, 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하여 제안된 센서의 실제 적용 가능성을 검증하였다.

2. 원통형 정전용량 변위센서 (CCS)

정전용량형 변위센서는 다른 종류의 센서보다 높은 분해능을 갖기 때문에 초정밀 측정이나 제어 분야에 널리 사용된다.

CCS는 두 가지의 방식이 존재하며 최대한 높은 분해능을 얻기 위하여 측정 면적을 최대화한 형태의 4 조각 CCS와 회전축 표면 형상의 3 주기 조화 성분의 오차에 민감한 4 조각 CCS를 보완한 8 조각 CCS가 그것이다². 8 조각 CCS는 각 센서 전극의 각도 크기를 변화시킴으로써 센서 유닛의 각도가 임의의 값이 되도록 할 수 있으며, 이를 통해 형상오차의 효과를 최소화할 수 있도록 최적의 센서 유닛의 각도 크기를 설계할 수 있다.

3. 반경 방향 및 축 방향 운동의 동시 측정을 위한 새로운 CCS

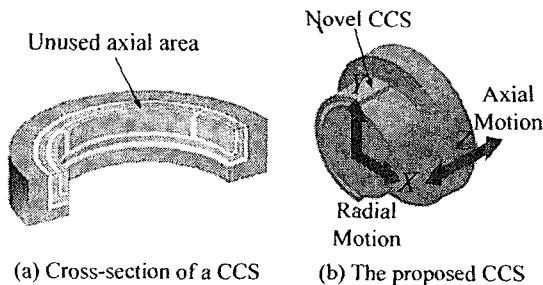


Fig. 1 The idea of the novel CCS

Fig. 1(a)는 CCS의 단면을 나타내며, 기존 CCS에서는 사용하지 않았던 축방향 단면을 보여준다. Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이, 축방향 운동의 측정에 CCS의 축방향 면을 이용하는 것이 새로운 CCS의 개념이다. 제안된 CCS의 경우 각각의 전극의 정전 용량은 식 (1)과 같이 축방향과 반경방향 두 개의 항으로 나누어 질 수 있다.

$$C_i = C_a + C_{ia} \quad (1)$$

여기서, C_a 는 축방향 측정면의 정전용량이며 C_{ia} 는 반경방향 측정면의 정전용량을 나타낸다.

회전축이 CCS에 가까워질수록 비선형 특성은

심해진다. 즉, 축방향 운동을 나타내기 위해서 정전 용량의 합을 직접적으로 이용할 수 없다. 측정된 회전축의 위치를 이용하여 전체 반경방향 정전용량을 보상해야만 한다. 그러므로, 반경방향과 축방향 측정의 분리 방법을 살펴보기 위하여 반경방향 운동 측정의 비선형 특성을 해석할 필요가 있다.

3.1 반경방향 운동 측정의 비선형 해석

b 는 센서의 반경, w 는 센서의 축방향 폭, δ 는 센서와 회전축 사이의 반경방향 틈새, α 는 회전축의 편심량 그리고 β 는 회전축 편심량의 위상각이라면 각도 크기 2ζ 의 CCS의 비선형 평균 이득은 정규화된 편심량의 합수인 식 (2)로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} X_{CCS}^1 &= 8 \frac{\varepsilon bw}{\delta} \frac{\alpha}{\alpha} \sum_{l=0}^{\infty} \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^{2l+2} \frac{1}{2^{2l+1}} \binom{2l+1}{l} \sin \zeta \cos \beta \\ &= 8 \frac{\varepsilon bw}{\delta} \frac{\alpha}{\alpha} \left(\frac{1}{\sqrt{1-(\alpha/\delta)^2}} - 1 \right) \sin \zeta \cos \beta \end{aligned} \quad (2)$$

3.2 보상 기법

보상 기법의 개념은 다음 식과 같이 반경방향 운동의 측정을 이용하여 부가 비선형성(additive nonlinearity)을 보상한다는 것이다.

$$C_z = \sum_i C_i - a \sqrt{X_{CCS}^2 + Y_{CCS}^2} - C_{offset} \quad (3)$$

여기서, a 는 보상 이득이며 X_{CCS} 와 Y_{CCS} 는 CCS로부터 측정된 변위이다.

식 (3)에서 제안된 보상 기법은 아날로그 회로로 구현하기에 매우 복잡하다. 더욱이 회전축이 CCS의 중심에 근접해 있다면 보상 오차는 매우 작을 것이므로 다음 식으로 단순화될 수 있다.

$$C_z = \sum_i C_i - a_m (|X_{CCS}| + |Y_{CCS}|) - C_{offset} \quad (4)$$

4. 오차 분석 및 설계법

4.1 축방향 측정에서의 오차 분석

제안된 CCS의 축방향 측정에 의한 두 가지의 본질적인 오차가 존재한다. 비선형 조화오차와 보상 오차가 그것이다. 이러한 두 가지의 오차는 축방향 측정에서의 비선형을 초래한다. 보상 오차가 비선형 조화오차보다 매우 크기 때문에 비선형 조화 오차는 해석에서 무시한다.

센서 출력으로부터 축방향 변위를 얻기 위해 다

음과 같은 역(inverse) 변환과 제곱(square) 변환의 두 가지의 신호 변환(signal conditioning) 방법을 적용할 수 있다.

$$Z_{CCS}^i = 1/C_Z - 1/C_{Z_0} \quad (5)$$

$$Z_{CCS}^s = (C_Z - C_{Z_0})^2$$

축방향 측정 오차는 CCS의 반경방향 두께, 축방향 폭, 축방향 및 반경방향 틈새 등 기하학적 형상에 의해 좌우된다. E_{comp} 가 최대 정규 부가 보상 오차라 하고 CCS의 Z 변위가 역 변환으로부터 얻어진다면 상태 측정 오차는 다음과 같이 계산된다.

$$RE_{ox}^i = \frac{E_{comp} \cdot \left| \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{max}}{\left(\frac{\delta}{\delta_o} \right)_{max} - \left(\frac{\delta}{\delta_o} \right)_{min} \left(\frac{r \cdot \delta}{\pi \cdot \delta_o} \right)_{min} - E_{comp}} \quad (6)$$

또한, 제곱 변환으로부터 Z 변위를 근사화한다면 상태 측정 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$RE_{ox}^s \approx \frac{2E_{comp}}{\frac{1}{w} \left(\frac{\delta}{\delta_o} \right)_{max} - \frac{\delta}{\delta_o} \left(\frac{\delta}{\delta_o} \right)_{min}} \quad (7)$$

4.2 반경 방향 측정에서의 오차 분석

반경 방향 측정에서의 상태 오차는 최악의 경우를 고려하여 식 (8)과 같이 근사화될 수 있다.

$$RE_r(x) \leq \frac{1}{2.5} \left(\frac{2}{x^2} \left(\frac{1}{(1-x^2)} - 1 \right) - 1 \right) \quad (8)$$

4.3 설계법

CCS의 설계 시 반경방향과 축방향 측정 모두 같은 수준으로 측정 가능하도록 설계하여야 하며, 반경방향과 축방향 측정에서의 오차를 같게 함으로써 반경방향 두께와 축방향 폭의 비 t/w 라는 중요한 설계인자를 얻어낼 수 있다.

$0.5 \leq \delta/\delta_o \leq 2$ 일 때 역 변환의 경우와 제곱 변환의 경우에 대해서 각각 필요로 하는 t/w 를 구하였으며 계산결과, 제곱 변환이 역 변환의 경우보다 보다 작은 축방향 면적을 필요로 한다.

5. 시뮬레이션 및 실험

5.1 실험 장치 구성

제안된 CCS의 성능을 평가하기 위해서, Fig. 2와 Fig. 3과 같이 실험장치를 구성하였다. 또한 제안된 CCS 및 회로를 Fig. 3에 나타내었다.

구성된 실험장치의 스테이지를 이동시키면서 X, Y 및 Z 방향 센서 출력을 동시에 측정, 기록하였다.

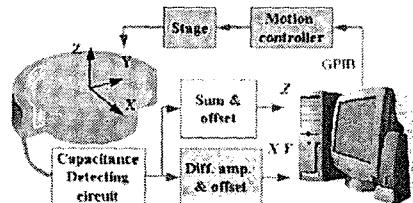


Fig. 2 Schematic of experiment

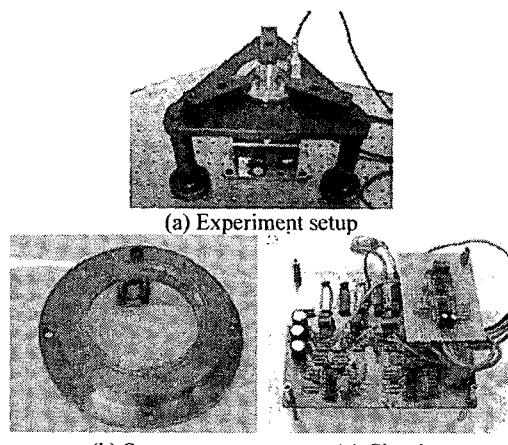
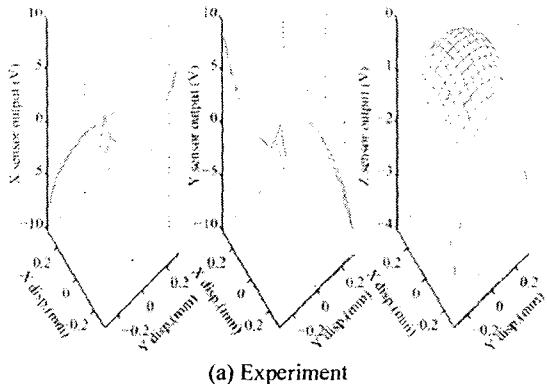


Fig. 3 Experiment setup

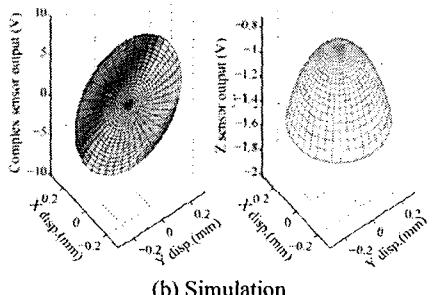
6. 결과

실험 결과 및 시뮬레이션 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 식 (1)과 같이 반경방향과 축방향 정전용량이 서로 독립적이라는 가정하에 시뮬레이션을 수행하였다. 보상하기 전의 Z 센서의 출력은 회전축의 위치에 대해 종속관계가 아주 크다. 또한 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 보상을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 반경방향 위치의 종속성이 눈에 띄게 감소하였다.

Z 센서의 출력을 역 변환 및 제곱 변환을 수행한 후, 측정된 축방향 운동과 그 변동량을 Fig. 6에 나타내었다. 제곱 변환의 오차가 역 변환의 오차보다 작았다. 설계된 CCS의 폭 비 t/w 는 0.417이고, 이것은 역 변환과 제곱 변환에 필요한 값의 중간값이다. 반경 방향 측정 시 상태 오차는 약 15%였으며 역 변환의 경우 측정된 오차가 25%인 반면 제곱 변환의 경우 측정된 오차는 9.7%였다. 또한, 역 변환의 경우 절대 영점 세팅이 필요하므로, 영점 세팅 역시 제곱 변환의 경우가 수월하다. 그러나 영점 세팅이 잘 된 경우, 선형성은 역 변환의 경우가 더 좋은 결과를 보인다.

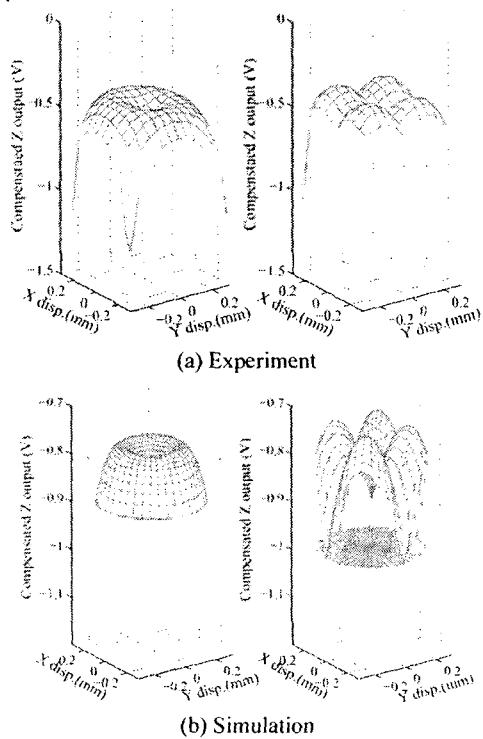


(a) Experiment

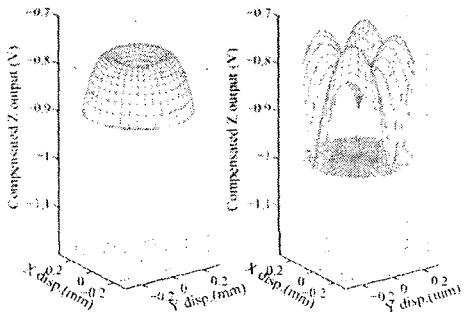


(b) Simulation

Fig. 4 Sensor outputs at $Z = 0.65$ mm



(a) Experiment



(b) Simulation

Fig. 5 Compensation results

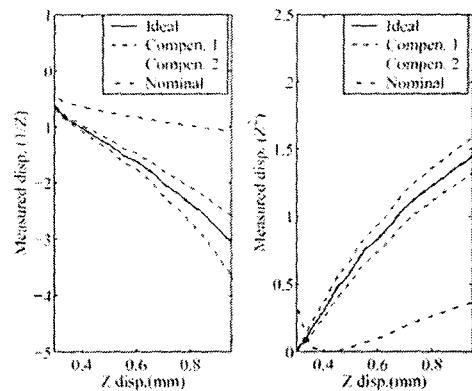


Fig. 6 Axial motion measurements

7. 결론

본 논문에서 반경 방향 및 축방향 동시 측정이 가능한 새로운 원통형 정전용량 변위센서(CCS)를 제안하였다. 회전축의 축방향 측정을 위하여 CCS의 사용되지 않던 면을 사용하였다. CCS에 본질적으로 존재하는 비선형성으로 인해 회전축의 반경방향 운동이 축방향 운동 측정에 영향을 미침에도 불구하고 반경방향 운동과 축방향 운동을 분리할 수 있는 간단한 보상기법을 제안하였다. 또한, CCS의 오차 분석을 수행하였으며 반경방향과 축방향 운동 측정에 동일한 정확도를 보장할 수 있는 설계법을 개발하였다. 최종적으로 제안된 CCS에 대한 시험장치와 회로를 구성하여 CCS의 성능을 실험과 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 제안된 CCS는 하드웨어 구성을 단순화 할 수 있고 시스템 설계 시보다 많은 유연성을 제공할 수 있다.

참고문헌

1. Ahn, H. J., Jeon, S., Han, D. C., 2000, Error analysis of the cylindrical capacitive sensor for active magnetic bearing spindles? Journal of Dynamics system, measurement, and control, trans. of ASME, Vol. 122, pp.102-107.
2. Jeon, S., Ahn, H. J., Chang, I. B. and Han, D. C., 2001, New Design of Cylindrical Capacitive Sensor for On-line Precision Control of AMB Spindle? IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, Vol. 50(3), pp.757-763.
3. Gradshteyn, I. S. and Ryzhik, I. M., 1982, Table integrals, series, and product, Academic press, Inc.