

자기베어링의 실시간 정밀제어를 위한 원통형 정전용량 변위센서의 새로운 설계

전 수* · 안 형준* · 한 동철**

New Design of Cylindrical Capacitive Sensor for On-line Precision Control of AMB Spindles

Soo Jeon, Hyeong-Joon Ahn and Dong-Chul Han

Key Words : Cylindrical capacitive sensor : CCS(원통형 정전용량 변위센서), Geometric error(형상오차), Active magnetic bearing(능동형 자기베어링)

Abstract

A new design of cylindrical capacitive sensor(CCS) for the displacement measurement of precision active magnetic bearing(AMB) spindle is presented in this paper. This research is motivated by the problem that existing 4-segment CCS is still sensitive to the 3rd harmonic component of the geometric errors of a rotor. The procedure of designing new CCS starts from the modeling and error analysis of CCS. The angular size of CCS is set up as a design parameter, and new 8-segment CCS is introduced to possess an arbitrary angular size. The optimum geometry of CCS to minimize the effect of geometric errors is determined through minimum norm approach. Experimental results with test rotors have confirmed the improvement in geometric error suppression.

1. 서론

능동형 자기베어링(active magnetic bearing)은 측정된 변위신호의 실시간 되먹임 제어를 통해 축을 부상시키는 장치이다. 따라서, 자기베어링의 성능은 측정된 센서신호의 특성에 의해 직접적으로 영향을 받는다. 특히, 머시닝 센터와 같은 정밀 공작 기계에 자기베어링을 사용할 경우 축의 형상오차에 의한 제어신호의 불필요한 진동 성분을 억제하는 것이 필수적이다.

자기베어링 시스템에서 가장 널리 사용되는 프로브(probe)형 센서는 근본적으로 형상오차에 대단히 취약하다. 따라서, 이러한 문제를 없애기 위해 실시간으로 형상오차를 감지, 보상하는 식별기법이 연구되었는데⁽¹⁾⁽²⁾, 이러한 소프트웨어적인 제어 기법을 이용한 오차 보상은 제어 시스템을 복잡하

게 하며, 높은 정밀도가 요구될수록 안정성이 떨어지는 단점이 있다.

원통형 정전용량 변위센서(cylindrical capacitive sensor)는, 형상오차의 평균화효과(spatial averaging)와 높은 분해능(high resolution)이라는 이점으로 Chapman⁽³⁾에 의해 처음 소개되었다. 장인배⁽⁴⁾는 수치해석을 이용한 원통형 정전용량 변위센서의 특성해석을 수행하였고, 안형준⁽⁵⁾은 원통형 정전용량 변위센서의 수학적 모델링을 통해 형상오차에 의한 오차특성을 밝혔으며, 프로브형 센서와의 비교를 통해 원통형 정전용량센서의 우수함을 이론 및 실험을 통해 정량적으로 입증하였다.

하지만 이러한 해석결과를 토대로 기존의 원통형 정전용량 변위센서가 형상오차의 홀수주기 성분, 특히 3주기 오차성분에 취약하다는 것이 밝혀졌다. 이것은 기존의 원통형 정전용량 변위센서가 형상오차 해석 결과를 고려하여 설계된 것이 아니라 단순히 측정면적을 최대화 하여 센서 증폭율(sensor gain)을 높이기 위해 설계되었기 때문이다.

본 논문에서는 원통형 정전용량 변위센서의 해

* 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

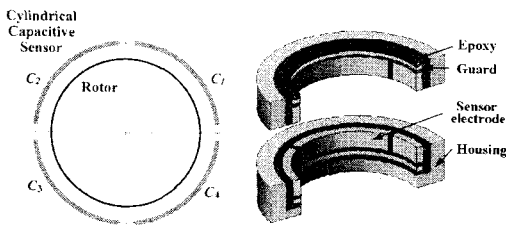
석결과를 바탕으로 기존의 문제점을 해결한 새로운 형태의 원통형 정전용량 변위센서를 제시하고자 한다. 임의의 센서크기를 가지며 특정 홀수 주기 형상오차 성분을 제거할 수 있는 8면 형상이 제안 되었으며, 형상오차 증폭계수(error amplification factor)의 1-놈(1-norm)을 최소화하는 과정을 통해 센서형상을 최적화하였다. 그리고, 실험을 통해 새로이 설계된 원통형 정전용량 변위센서의 성능을 입증하였다.

2. 모델링

2.1 원통형 정전용량 변위센서(CCS)

정전용량 변위센서는, 다른 방식의 변위센서에 비해 높은 분해능을 가지므로 소구간 초정밀 측정 및 제어 시스템에 널리 사용된다. 정전용량 센서는 일반적으로, 측정면적 대 대상면과의 거리의 비가 클수록 높은 정밀도와 분해능을 가진다. 또한, 측정면적 대 측정면 표면조도의 비가 클수록 형상오차의 평균화효과가 커진다. 따라서, 기존의 4면식 원통형 정전용량센서(4-segment CCS)는 차동 측정방식(differential configuration)을 유지하면서 동시에 센서 측정면적을 최대화하기 위해 아래 Fig. 1(a)와 같이 설계되었다. 측정된 변위는 아래의 식(1)을 통해 얻어지며, 그 구조는 Fig. 1(b)에서와 같이, 4 개의 센서판(sensing electrodes), 가드(guard), 그리고 절연을 위한 에폭시 접착제(epoxy resin)로 이루어진다.

$$\begin{aligned} X &= \text{gain}(C_1 + C_4 - C_2 - C_3), \\ Y &= \text{gain}(C_1 + C_2 - C_3 - C_4) \end{aligned} \quad (1)$$

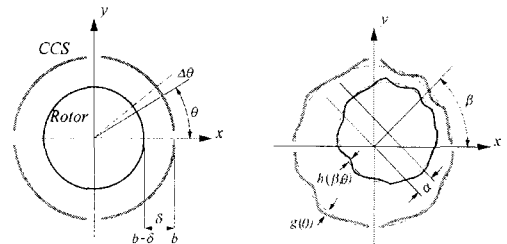


(a) Configuration (b) Elements
Fig. 1 Conventional CCS

2.2 원통형 정전용량 변위센서의 수학적 해석

설계변수를 구하기 위해 원통형 정전용량 변위센서의 수학적 해석⁽⁵⁾⁽⁷⁾을 간략히 정리하고자 한다. 먼저, Fig. 2의 형상 변수들을 이용하여 형상오차를 고려한 미소 정전용량을 구하면 아래와 같다.

$$\Delta C = \epsilon \frac{b \Delta \theta w}{\delta - \alpha \cos(\theta - \beta) - h - g} \quad (2)$$



(a) Ideal case (b) Eccentric case with roundness errors
Fig. 2 Variables for Small Capacitance

여기서, b 는 센서반경, δ 는 센서와 축사이의 간극, $\Delta\theta$ 는 미소 센서 측정면, ϵ 은 유전율, α 는 공전반경, β 는 회전각도, 그리고 h, g 는 각각 축과 센서의 형상오차를 나타낸다.

형상오차의 특정 주기 m 과 위상각 γ, ϕ 를 이용하여 축 및 센서의 형상오차를 모델링하면 아래와 같다.

$$h = \sum_{m=2}^{\infty} h_m \cos(m(\theta - \beta) + \gamma_m) \quad (3)$$

$$g = \sum_{m=2}^{\infty} g_m \cos(m(\theta - \beta) + \phi_m) \quad (4)$$

식 (2)에서 센서 및 회전축의 형상오차는 동일한 특성을 가지므로, 본 논문에서는 축의 형상오차만 고려하기로 한다. 공전반경 α 와 틈새 δ 에 비해 센서반경 b 가 충분히 크다고 가정하면, 식 (2)는 아래와 같이 근사화된다.

$$\Delta C = \frac{\epsilon b w}{\delta} \left(1 + \frac{\alpha}{\delta} \cos(\theta - \beta) + \frac{h}{\delta}\right) \Delta \theta \quad (5)$$

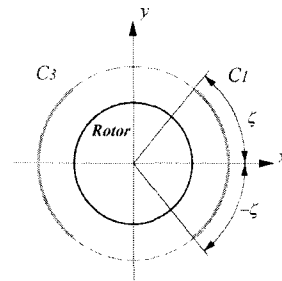


Fig. 3 Angular Size ζ of CCS

Fig. 3 에서와 같이 센서판의 크기를 나타내는 변수 ζ 를 도입하면 축중심의 변위를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$X = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Delta C - \int_{\pi/2-\zeta}^{\pi+\zeta} \Delta C, \quad Y = \int_{\pi/2-\zeta}^{\pi/2+\zeta} \Delta C - \int_{3\pi/2-\zeta}^{\pi/2-\zeta} \Delta C \quad (6)$$

ζ 가 0° 에 접근하면 센서는 이상적인 프로브형이 되고, 90° 에 접근하면 기존의 4면식 원통형 정전용량 변위센서가 된다. 식(6)을 적분하여 변위를 구하면, 짝수주기 형상오차에 대해서는 오차항이 없어짐을 발견할 수 있는데, 이는 차동 측정방식을 이용하면 짝수주기 성분을 없앨 수 있음을 뜻

한다. 반면에 홀수주기 성분들에 대해서는 아래의 결과식을 통해 형상오차에 의한 측정 오차항이 존재함을 확인할 수 있다.

$$X = \frac{4ebw\sin\zeta}{\delta^2} \left\{ \alpha \cos\beta - \sum \frac{h_m}{m\sin\zeta} \sin m\zeta \cos(m\beta + \gamma_m) \right\} \quad (7)$$

여기서, 앞 쪽의 계수는 센서의 증폭율을 나타내며, 중괄호 내부의 첫째 항은 실제 측정값의 위치를, 그리고, 마지막에 나타나는 항이 회전축의 형상오차에 의한 측정 오차 항이다. 측정 오차 항의 특성을 보기 위해, 식(8)과 같이 무차원화된 변수인 형상오차 증폭계수(error amplification factor)를 정의하였다. 이는 측정오차에 대한 각 형상오차 주기성분의 비를 의미한다.

$$\frac{e_m}{h_m}(\zeta) = \frac{\sin m\zeta}{m\sin\zeta} \quad (m = 3, 5, 7, \dots) \quad (8)$$

아래 Fig. 4 에서 알 수 있듯이, ζ 가 0°에 접근하면 형상오차 증폭계수는 모두 1로 수렴하며, 이는 프로보형 센서의 경우 모든 주기 성분의 형상오차가 그대로 측정오차에 포함됨을 의미한다. 반면에, ζ 가 90°에 접근하면, 기존의 4면식 원통형 정전용량 변위센서의 측정오차 특성을 나타낸다. 또한, 형상오차 증폭계수는 센서크기가 커지면서 평균화 효과에 의해 그 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

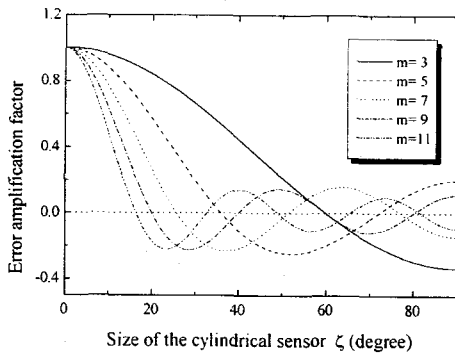


Fig. 4 Error Amplification Factor with Various Odd Harmonic Numbers of m

Fig. 4 에서 알 수 있는 또 하나의 중요한 정보는 센서판의 크기 ζ 를 적절히 선정함으로써 임의의 홀수 주기성분을 제거할 수 있다는 점이다. 그리고, 이러한 ζ 는 아래의 간단한 식으로 주어진다.

$$m\zeta = n\pi, \quad 0^\circ \leq \zeta \leq 90^\circ \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

예를 들어, ζ 가 60°이면 3주기 형상오차를 제거할 수 있으며, 36°나 72°이면 5주기 형상오차를 제거할 수 있다. 또한, 식 (9)에서 기존의 4면식 원통형 정전용량 변위센서는 2주기 성분을 제거하도록 설계된 것이라 볼 수 있다. 하지만, 짝수주기는

차동에 의해 자동적으로 제거되므로, 기존의 4면식은 잘못된 설계임을 알 수 있다.

3. 설계

3.1 임의의 각도 크기를 갖기 위한 센서형상

Fig. 1에서 알 수 있듯이 기존의 4면식 원통형 센서는 임의의 각도크기를 가질 수 없으므로, 본문에서는 임의의 각도크기를 갖기 위한 Fig. 5와 같은 새로운 8면식 형상의 원통형 정전용량 변위센서(8-segment CCS)를 제안한다. 개별 측정면(sensing unit)의 전체 크기 2ζ 는 2개의 공유면(shared segment : S_S)과 1개의 비공유면(unshared segment : S_U)으로 이루어지며, 아래의 두식을 만족해야 한다.

$$2\zeta = 2S_S + S_U \quad (10)$$

$$S_S + S_U = 90^\circ \quad (11)$$

공유면과 비공유면의 각도 크기를 조절함으로써 임의의 각도를 갖는 센서를 얻을 수 있다.

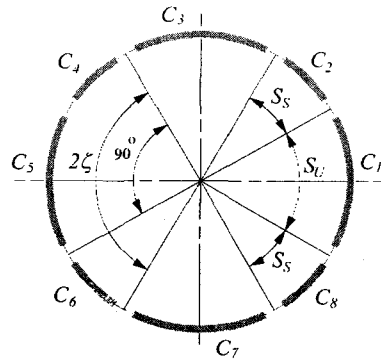


Fig. 5 New 8 Segment CCS

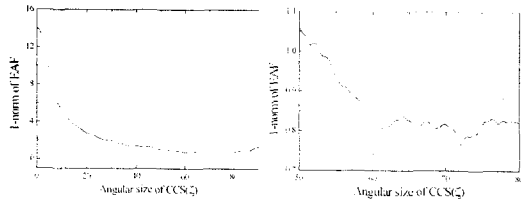
이제 주어진 문제는 어떤 ζ 값이 형상오차에 의한 측정오차성분을 최소화할 수 있는냐 하는 것이다. 형상오차의 분포는 정해진 규칙이 없으므로 그 경향을 객관적으로 밝히기는 어렵지만, 일반적으로 고차 주기 성분들은 평균화효과 뿐만 아니라 제어기의 대역폭(bandwidth) 등에 의해 그 영향이 작아지므로 무시할 수 있다. 또한, 주로 영향을 미치는 저차 주기 성분들 중에서 특히 3주기 오차 성분이 중요하다는 것을 직관적으로 예상할 수 있는데, 그 이유는, 첫째 최대의 형상오차 증폭계수를 가지며, 둘째 홀수주기 성분들 중에서 가장 많은 배수를 갖기 때문이다. 또한, 실제 회전축에서도 저차의 2, 3주기 성분들이 일반적으로 큰 값을 가짐이 잘 알려져 있다. 따라서, 센서의 각도 크기 ζ 를 60°로 선택하는 것이 바람직하다는 것을 직관적으로 추측할 수 있다.

3.2 센서 각도 크기의 최적화

실제의 형상오차는 다양한 주기 성분들의 합으로 이루어진다. 따라서, 여러 가지 형상오차 성분의 절대값의 합, 즉 형상오차 증폭계수의 1-놈을 최소화하고자 하는 가중함수로 정하였다.

$$F(\zeta) = \left\| W(m) \frac{e_m}{h_m}(m, \zeta) \right\| = \sum_{m=3,5,\dots} \left| W(m) \frac{e_m}{h_m}(m, \zeta) \right| \quad (12)$$

여기서 $W(m)$ 은 가중함수를 뜻한다.



(a) ζ from 0° to 90° (b) ζ from 50° to 80°
Fig. 6 1-Norm of the Error Amplification Factor

가중함수를 1로 정하고 29 주기까지의 형상오차를 고려하면, 가중함수 $F(\zeta)$ 는 Fig. 6(a)와 같이 나타나며, $F(\zeta)$ 의 전역최소값을 찾기 위해 ζ 가 50°~80°인 구간을 확대하여 Fig. 6(b)에 나타내었다. 3주기 오차성분에 의한 첫번째 국소최소값이 60°에서 나타나며, 5주기 오차성분에 의한 두번째 국소최소값이 72°에서 나타난다. 이 중, 전역 최소값은 60°임을 알 수 있다.

하지만, 위의 결과는, 모든 주기 성분들이 동일한 크기의 형상오차를 갖는다고 가정한 경우이므로 실제상황과 다르다고 볼 수 있다. 일반적으로 형상오차 성분 중에서 고차 주기성분보다는 저차 주기성분이 큰 값을 가지므로 $1/m$ 의 가중함수를 가정하여 형상오차 증폭계수의 1-놈을 구하면 아래 Fig. 7 과 같이 나타난다.

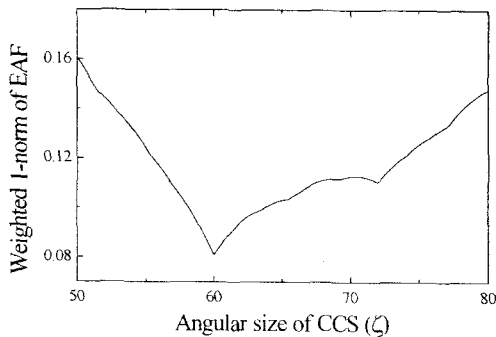


Fig. 7 Weighted 1-Norm of Error Amplification Factor

Fig. 7에서도 알 수 있듯이, $F(\zeta)$ 는 $\zeta=60^\circ$ 에서 최소값이 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이러한 해석결과는, 앞서의 직관적인 판단과 일치한다.

3.3 최적 원통형 정전용량 변위센서

ζ 를 60°로 선정하면, 개별 측정면의 전체크기는 120°가 되며, 축중심의 위치 X, Y 는 아래식 (13)에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} X &= (C_8 + C_1 + C_2) - (C_4 + C_5 + C_6) \\ Y &= (C_2 + C_3 + C_4) - (C_6 + C_7 + C_8) \end{aligned} \quad (13)$$

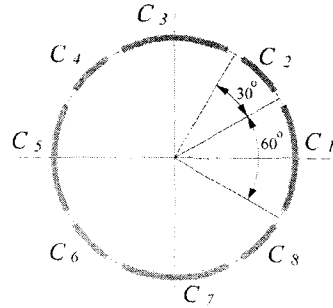


Fig. 8 Optimal Design of CCS

4. 실험 결과

4.1 실험장치 개요

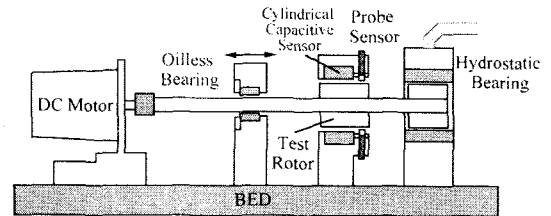


Fig. 9 Experimental Setup

설계된 8면 원통형 정전용량 변위센서의 성능을 검증하기 위해 Fig. 9와 같은 실험장치를 구성하였다. 축의 한 쪽은 정수압베어링으로 지지되며, 반대쪽은 축방향으로 이동이 가능한 오일리스 베어링에 의해 지지된다. 센서 하우징은 베어링 사이에 위치하며 축중심의 궤적은 회전속도를 바꾸거나, 오일리스 베어링의 위치를 변화시키면서

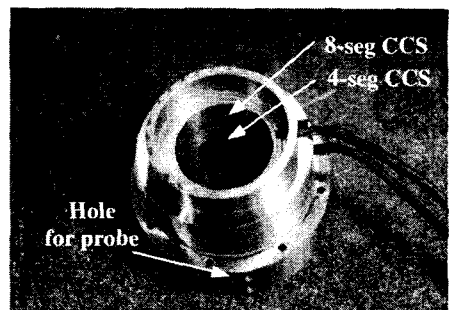


Fig. 10 Sensor Housing

조절하였다. 센서 성능 비교를 위하여 세 종류의 센서가 사용되었다. 프로브형 정전용량 센서 (PX405HA, LION PRECISION), 기존의 4면 원통형 정전용량 센서, 그리고, 새로운 8면 원통형 정전용량 센서가 사용되었다. 센서를 장착하는 하우징의 사진을 Fig. 10에 도시하였다.

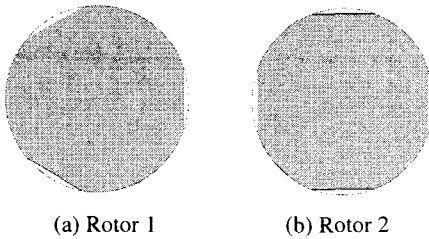


Fig. 11 Test Rotors(Dia. 50 mm, Depth of cut 50 μm)

축의 형상오차를 구현하기 위해 Fig. 11과 같은 시험축(test rotor)을 고안하였다. 시험축 1은 홀수 주기, 특히, 3주기형상오차를 구현하기 위한 것이며, 시험축 2는 짝수주기를 구현하기 위한 것이다. 실제로, 수 마이크로크기의 원하는 형상오차 성분을 갖는 회전축을 가공하기는 거의 불가능하다. 하지만, 식 (7)에서 알 수 있듯이, 축중심 변위 α 와 형상오차의 크기 h 사이의 비가 유지되기만 하면 실제 측정오차에 미치는 영향은 동일하다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 간극 δ 가 형상오차나 축중심 변위의 크기보다 10 배이상 충분히 크다는 가정 하에서 성립된다. 따라서, 축과 센서사이의 간극 δ 를 500 μm으로, 그리고, 면취 깊이를 50 μm으로 정하였다. Fig. 12는 이러한 시험축의 형상오차를 푸리에 급수를 이용하여 각 주기 성분별로 분해한 것이다.

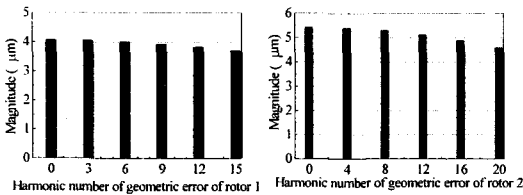
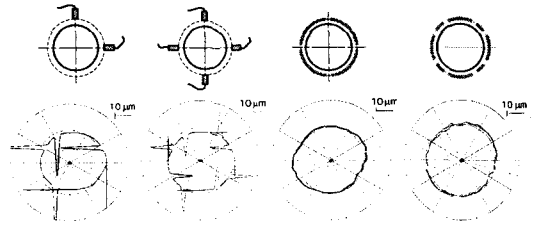


Fig. 12 Magnitudes of Harmonic Errors of Test Rotors

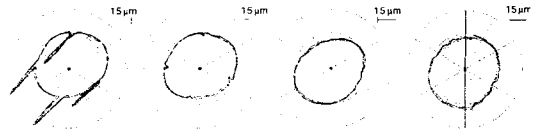
Fig. 12를 통해 알 수 있듯이, 시험축을 사용함으로써 얻게 되는 잇점은 크게 두 가지이다. 첫째, 시험축은 실제로 기본 주기(3 주기, 4 주기) 이외에 다양한 배수주기 성분을 가지며, 각 주기성분의 크기는 4-5 μm 정도로 실제값과 유사하다. 둘째, 각 주기성분의 크기가 거의 비슷하므로, 형상오차 특성이 가장 불리한 경우에 해당한다. 따라서, 이

러한 시험축에 대한 형상오차 제거 성능이 만족된다면, 실제 형상오차에 대해서도 충분히 그 성능이 만족된다고 볼 수 있다.

4.2 실험결과



(a) Rotor 1 (20 μm orbit radius)



(b) Rotor 2 (30 μm orbit radius)

Fig. 13 Measured Orbits of Test Rotors with Various Sensor Types

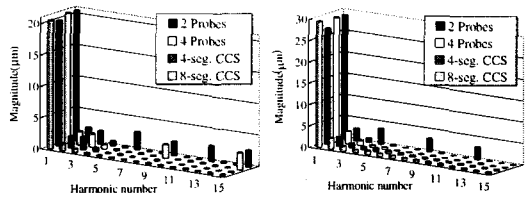


Fig. 14 Spectrums of Measured Orbits

Fig. 13은 20 μm의 회전반경을 갖는 시험축 1에 대한 측정 결과 및 30 μm의 회전반경을 갖는 시험축 2에 대한 측정결과를 나타낸다. 그리고, Fig. 14는 이러한 측정계측의 FFT 변환을 통한 각 주기성분의 스펙트럼을 나타낸다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 3주기 오차를 갖는 시험축 1에 대해서, 프로브형 센서의 경우 형상오차가 그대로 유입되었다. 그리고, 4주기 성분을 갖는 시험축 2에 대해서는 차동시키지 않은 프로브형 센서에 대해서만 형상오차가 유입되었다. 이것은 센서를 차동시켜 사용할 경우, 해석 결과에서와 같이 센서면의 크기에 무관하게 짝수주기 성분을 제거할 수 있음을 보여준다. 모든 경우에 대해서 원통형 정전용량 변위센서들은 형상오차에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 14에서는 왜곡된 회전 궤적들이 구체적으로 어떤 형상오차 주기 성분들로부터 영향을 받는지를 확인할 수 있다. 위의 결과에서는

형상오차성분에 비해 회전궤적이 상대적으로 크기 때문에 기존의 4면 원통형 정전용량 변위센서와 새로운 8면 원통형 센서 사이의 성능차이를 구별하기 어렵다. 따라서, 회전궤적의 크기를 형상오차 주기성분에 가깝도록 줄여서 다시 실험을 수행하였다.

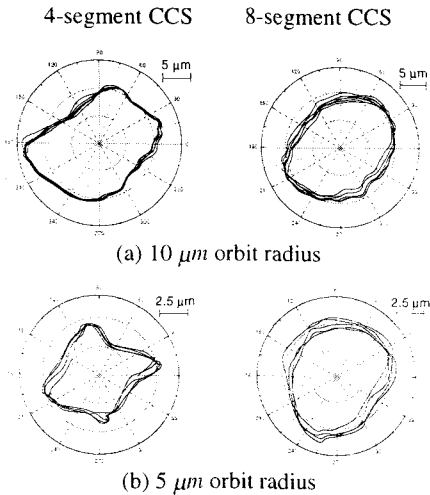


Fig. 15 Measured Orbits for Rotor 1 with the Conventional CCS and the New CCS

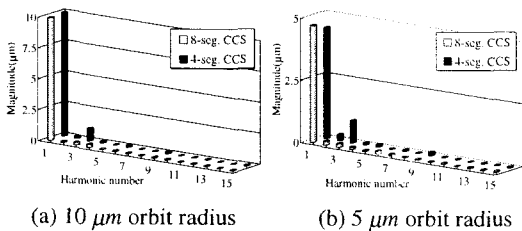


Fig. 16 Spectrums of Measured Data for Rotor 1 with the New CCS and the Conventional CCS

Fig. 15는 시험축 1에 대해서만 측정된 회전궤적을 나타낸다. 회전반경이 $10\ \mu\text{m}$ 일 경우 4면 원통형 센서의 측정결과에서 왜곡이 생기기 시작한다는 것을 알 수 있으며, 회전반경이 $5\ \mu\text{m}$ 로 더욱 작아지면, 이러한 형상오차에 의한 회전궤적의 왜곡현상이 더욱 뚜렷해짐을 확인할 수 있다. 반면에 새로 설계된 8면 원통형 정전용량 변위센서의 경우에는 축 중심의 회전궤적을 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다. 마찬가지로 Fig. 16을 통해 이러한 4면 원통형 센서의 왜곡된 궤적이 주로 3주기 오차성분에 의해 유발된 것임을 확인할 수 있다.

5. 결론

원통형 정전용량 변위센서의 수학적 해석결과를 바탕으로 8면을 갖는 새로운 형태의 원통형 정전용량 변위센서를 제안하였다. 이러한 8면 원통형 정전용량 변위센서는 센서 측정면의 각도 크기를 변화 시킴으로써, 형상오차의 짝수주기 성분의 외에, 임의의 특정한 홀수주기성분을 제거할 수 있다. 형상오차 증폭계수의 1-능을 최소화함으로써, 형상오차에 의한 영향을 최소화할 수 있는 최적의 센서형상을 구하였다. 실험을 통하여 새로 설계된 8면 원통형 정전용량 변위센서의 우수한 형상오차 제거성능을 입증하였다. 따라서, 새로운 원통형 센서는 정밀 측정 및 실시간 제어시스템의 정밀도와 신뢰성을 향상시키며, 다양한 용도로 활용될 수 있으리라 여겨진다.

후기

본 과제는 서울대학교 기계항공공학부 BK-21 과제의 후원으로 진행되었으며, 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Mitsui, K., 1982, "Development of a New Measuring Method for Spindle Rotation Accuracy by Three-points Methods," *Proceedings of the 23rd int. MTDR*, pp. 115-121.
- (2) Gao, W., Kiyono, S. and Sugawara, T., 1997, "Roundness Measurement by New Error Separation Method," *J. of Precision Engineering*, Vol. 21, pp. 123-132.
- (3) Chapman, P. D., July, 1985, "A Capacitive based Ultraprecision Spindle Error Analyser," *J. of Precision Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 129-137.
- (4) In-Bae Chang., 1994, "A Study on the Performance Improvement of a Magnetic Bearing System Using Built-in Capacitive Type Transducers," Ph.D Dissertation, Seoul National University, Korea.
- (5) Ahn, H. J., Jeon, S., and Han, D. C., March, 2000, "Error Analysis of the Cylindrical Capacitive Sensor for Active Magnetic Bearing Spindles," *ASME J. of Dyn. Sys., Measurement, and Control*, Vol. 122, No. 1, pp.102-107.
- (6) Alexander H. Slocum, 1992, "Precision Machine Design," Prentice-Hall, Inc..
- (7) Hammond Jr., J. L., and Glidewell, S. R., 1983, "Design of Algorithms to Extract Data from Capacitance Sensors to Measure Fastener Hole Profiles," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. 32, pp.343-349.