

5 차원 변위 측정용 원판형 정전용량 센서

A Disk-type Capacitive Sensor for Five-dimensional Motion Measurements

안형준† · 박정호* · 엄창용**

Hyeong-Joon Ahn, Jung-Ho Park and Chang-Yong Um

Key Words: Disk-type capacitive sensor (원판형 정전 용량 센서), Error analysis (오차 분석).

ABSTRACT

This paper presents a disk-type capacitive sensor for simultaneous measurement of five-dimensional motions of a target. The sensor can be manufactured with a printed circuit board (PCB) such that the sensor can be integrated with its electronics in a single PCB board, whereby the manufacturing costs is considerably reduced. The sensor is optimally designed through an error analysis of possible mechanical errors. Furthermore, the sensor can correct the horizontal motion measurement errors due to the sensor installation tilting error. A proto-type PCB sensor, electronics and a test rig were built, and the effectiveness of the developed sensor was proved through experiments.

기호설명

b	센서 평균 반지름
Δb	대상체의 진원도 오차
C_n	n 번째 변위 센서 조각의 정전 용량
C_{nC}	n 번째 기울어짐 센서 조각의 정전 용량
C_z	축방향 정전용량
ΔC	미소 정전용량
m	오차의 주기
r	반경 방향 좌표
r_{1c}, r_{2c}	기울어짐 보상 센서의 내경과 외경
t	센서 너비
X, Y, Z, θ	대상체의 변위
X_C	기울어짐 오차의 측정값
X_{err}	형상 오차에 의한 측정 오차
a	대상체 편심의 크기
β	대상체 편심의 위상
δ	센서와 대상체 사이 공극
$\Delta\delta$	형상오차에 의한 공극 오차
γ	형상 오차의 위상
ε	공기의 유전율
ϕ	센서 설치 기울어짐 오차
θ	원주방향 각도 좌표
ζ	센서의 각도크기

1. 서론

지능형 측정 시스템은 초정밀 메카트로닉스 기술 기반의 차세대 생산 시스템에서 아주 중요한 역할을 한다. 예를 들어 반도체 장비용 초정밀 위치 결정 장치가 충분한 위치 반복 정밀도를 가지기 위해서는 폐환 제어를 위한 변위 측정이 필요하다 [1]. 또한,

회전 기계의 경우 그 성능을 향상시키기 위하여 자기베어링과 같은 능동형 베어링의 사용이 늘어나고 있으며 이러한 경우도 또한 변위 측정을 통한 폐환 제어를 사용한다 [2-5]. 따라서 사용되는 변위 센서가 시스템의 성능뿐 아니라 크기 및 복잡성에도 영향을 준다.

2 차원 미세 위치 제어용 측정 기구로 판형 정전용량 센서가 개발 되었으나 센서와 대상체 사이의 공극 변화 등 여러 가지 오차에 대한 해석 및 설계 기준이 완벽히 연구되지 못하였기 때문에 널리 사용되지 않는다 [6-8]. 회전기계용 원통형 정전용량 센서는 형상오차에 둔감하고 큰 측정 면적으로 분해능이 높은 장점이 있지만 [9, 10] 측정 범위가 좁고 비선형성이 크며 제작의 어려움으로 인하여 그 응용 범위가 넓지 못하다 [11, 12].

본 논문은 5 차원 변위 측정을 위한 원판형 정전용량 센서에 관한 것이다. 개발 대상 센서는 면적 변화에 따른 정전용량 변화를 측정하기 때문에 넓은 측정 범위를 가지고, 인쇄 회로 기판으로 제작 하여 제작 시의 노력과 비용을 크게 줄일 수 있다. 우선 개발된 센서의 측정 과정을 수학적으로 모델링하고 여러 형상 오차가 측정에 미치는 영향에 대한 이론과 수치 계산을 통하여 분석하였다. 이러한 오차 분석을 기반으로 개발된 센서의 설계 기준을 제시하였고 변위 측정 시 가장 문제가 되는 센서 설치 오차를 보상할 수 있는 방법을 제안하였다. 인쇄 회로 기판으로 원판형 정전용량 센서를 제작하고 자동화된 XYZ 이송장치로 변위 측정 시험을 수행하여 개발된 센서를 통하여 3 차원 변위 측정과 기울어짐에 따른 오차 보상이 가능함을 실험적으로 확인하였다

2. 원판형 정전용량 센서

2.1 원판형 센서의 변위 측정 [13]

Figure 1(a)와 같이 공극 변화를 이용하는 원통형 센서 (Cylindrical capacitive sensor: CCS)의 경우 비선형성이 커서 아주 작은 측정 범위 내에서만

† 숭실대학교 기계공학과
E-mail : ahj123@ssu.ac.kr
Tel : (02) 820-0654, Fax : (02) 820-0668

* 숭실대학교 대학원

** 주식회사 컨벡스

사용되지만 판형 정전 용량 센서 (plate-type capacitive sensor: PCS)는 면적 변화를 이용하기 때문에 측정 범위에 관계없이 선형성이 우수하다. 하지만, 대상체와 센서 사이의 공극이 일정하게 유지되어야 한다는 단점이 있다.

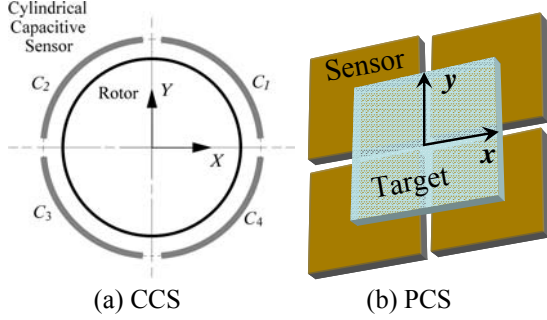


Fig. 1 Cylindrical and disk-type capacitive sensor

본 논문에서 제안하는 원판형 센서는 Fig. 2 와 같이 부채꼴 모양의 평판 센서 전극, 가이드, 그리고 원형 대상체로 구성된다. Figure 2 (a)와 (b)에 대상체의 크기가 센서 전극보다 크거나 작은 경우의 센서와 대상체의 개략적인 형상을 나타냈다. 센서와 대상체 사이 정전용량은 사이 공극과 공통 면적에 지배되며 여기에 대상체의 3차원 변위 정보가 포함되어 있다.

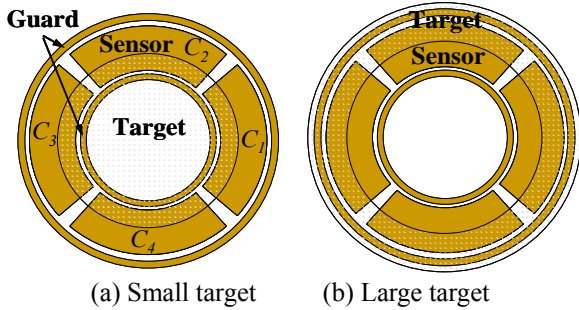


Fig. 2 Disk-type capacitive sensor configurations

원판형 정전 용량 센서는 센서 전극들과 대상체 사이의 정전용량의 차를 이용하여 3차원 변위를 식 (1)과 같이 측정할 수 있다. 여기서 X, Y 변위는 전체 정전용량의 합, 즉 축 방향 정전 용량(C_z)으로 나누어 공극 변화의 영향을 보상한다.

$$\begin{aligned} X &= Gain \left(\frac{C_1 - C_3}{C_z} \right), Y = Gain \left(\frac{C_2 - C_4}{C_z} \right) \\ Z &= Gain \left(\frac{1}{C_z} \right), C_z = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \end{aligned} \quad (1)$$

이러한 3차원 변위 정보에 대상체의 기울어짐, 즉, 대상체의 2차원 각도 변위를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 대상체로 덮이는 센서를 추가로 배치한다.

(대상체가 큰 경우는 측정 센서의 바깥 부분에 기울어짐 센서를 추가한다.) 기울어짐 센서의 출력은 식 (2)와 같이 표현할 수 있고 대상체로 완전히 덮이므로 센서와 대상체 사이의 기울어짐이 없다면 그 출력은 0이다. 하지만 기울어짐이 발생하면 대상체의 편심이 없어도 각 센서 조각의 정전 용량 차이가 발생하여 대상체의 기울어짐이 출력된다.

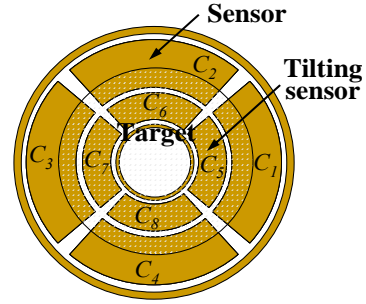


Fig. 3 Angle measurements

$$\begin{aligned} \vartheta_y &= Gain \left(\frac{C_5 - C_7}{C'_z} \right), \vartheta_x = -Gain \left(\frac{C_6 - C_8}{C'_z} \right) \\ C'_z &= C_5 + C_6 + C_7 + C_8 \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 수학적 모델링

기울어짐 측정의 식 (2)는 3차원 변위 측정 과정 식 (1)과 동일하기 때문에 수학적 모델링은 3차원 변위 측정만 수행한다. 원판형 정전 용량 센서와 대상체 사이의 미소 정전 용량은 식 (3)으로 표현된다.

$$\Delta C = \varepsilon \frac{r \Delta r \Delta \theta}{\delta} \quad (3)$$

여기서 ε 은 유전율, r 은 반경, θ 는 각도 그리고 δ 는 센서와 대상체 사이 공극이다.

각도 크기가 ζ 인 네 개의 평판 센서 전극으로 이루어진 Fig. 4의 정전 용량 센서에서 대상체가 편심 각도(β)에서 편심 거리(α)를 가지고 있을 때 작은 대상체의 외경은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$b_\alpha = b + \alpha \cos(\theta - \beta) \quad (3)$$

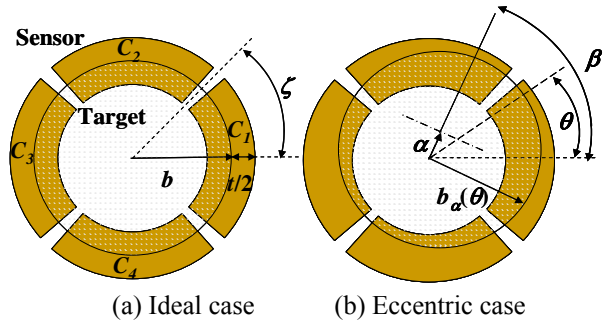


Fig. 4 Ideal and eccentric case

모든 면적에서 센서와 대상체 사이의 전기장이 평행하다고 가정하면 대상체가 작은 경우 센서 조각과 축 방향 정전 용량은 식 (5)처럼 미소 정전 용량을 적분하여 구할 수 있다. 괄호 안의 식은 대상체가 큰 경우를 나타낸다.

$$C_n = \int_{\frac{(n-1)\pi}{2}-\zeta}^{\frac{(n-1)\pi}{2}+\zeta} \int_{b-t/2}^{b_t} \Delta C \left(\int_{\frac{(n-1)\pi}{2}-\zeta}^{\frac{(n-1)\pi}{2}+\zeta} \int_{b_t}^{b+t/2} \Delta C \right) \quad (5)$$

$$C_z \cong \int_0^{2\pi} \int_{b-t/2}^{b_t} \Delta C \left(\int_0^{2\pi} \int_{b_t}^{b+t/2} \Delta C \right)$$

식 (5)의 정전용량을 식 (1)에 대입하여 대상체의 변위를 계산하면 식 (6)과 같다. 위 부호는 작은 대상체, 아래부호는 큰 대상체의 경우를 나타낸다.

$$X = \frac{C_1 - C_3}{C_z} = \pm \frac{4 \sin \zeta}{\pi t \left(1 \mp \frac{t}{4b} \pm \frac{\alpha^2}{2bt} \right)} \alpha \cos \beta \quad (6)$$

$$Y = \frac{C_2 - C_4}{C_z} = \pm \frac{4 \sin \zeta}{\pi t \left(1 \mp \frac{t}{4b} \pm \frac{\alpha^2}{2bt} \right)} \alpha \sin \beta$$

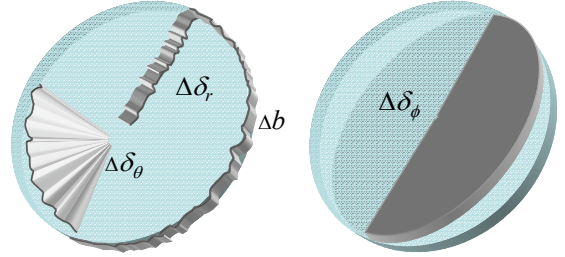
$$Z \approx \frac{1}{C_z}, C_z = \varepsilon \frac{\pi b t}{\delta} \left(1 \mp \frac{t}{4b} \pm \frac{\alpha^2}{2bt} \right)$$

센서의 측정 범위는 센서 전극의 폭 t 에 비례하고, 축 방향 변위와 관련된 C_z 는 센서 폭 t 와 센서의 평균 반지름 b 에 비례한다. 반경 방향 변위의 센서 이득은 센서 폭 t 에 반비례하고 센서 전극의 각도에 관계된 $\sin \zeta$ 에 비례한다. 또한, 변위 측정에서의 비선형성은 수직 수평 방향 측정 모두 식 (6)에서와 같이 $\left(1 \mp \frac{t}{4b} \pm \frac{\alpha^2}{2bt} \right)$ 에 지배된다. 즉, 대상체의 편심이 증가할수록 비선형성도 증가하지만 센서 평균 반지름을 늘리고 센서의 폭은 줄이면 비선형성을 크게 줄일 수 있다.

3. 형상 오차 영향 분석 [9, 13]

원판형 정전 용량 센서에서 발생할 수 있는 형상 오차는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 대상체의 표면 불균일에 의한 공극 오차($\Delta\delta_\theta$, $\Delta\delta_r$), 대상체의 진원도에 따른 오차 (Δb) 그리고 센서 설치 시 발생하는 기울어짐 오차 ($\Delta\delta_\phi$) 등이 있다.

모서리 효과가 없고, 센서와 대상체의 사이의 전기장은 모두 평행하다고 가정하고 각 오차를 수학적으로 모델링하고 그 영향을 살펴본다. 대상체가 센서보다 작은 경우의 X 방향 변위에 대해서만 해석을 수행한다.



(a) Air gap and roundness error (b) Installation error
Fig. 5 Geometric errors of the sensor

3.1 공극 오차

대상체 측정 면에 형상 오차가 존재하면 센서와 대상체 사이의 공극이 일정하지 않게 된다. 이러한 표면 형상 오차에 의한 공극 오차를 원주 및 반경 방향으로 구분하여 해석을 수행한다.

(1) 원주 방향 공극 오차

원주 방향 공극 오차를 오차 주기 m 에 따라 푸리에 (Fourier) 급수로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_\theta = \delta + \sum \Delta\delta_\theta^m \cos m(\theta - \gamma_m) \quad (7)$$

이를 식 (3)에 대입하면 미소 정전 용량은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\Delta C = \frac{\varepsilon r \Delta r \Delta \theta}{\delta + \sum \Delta\delta_\theta^m \cos m(\theta - \gamma_m)} \quad (8)$$

오차 $\Delta\delta_\theta^m$ 가 공극 δ 에 비해 작기 때문에 테일러 (Taylor) 급수로 근사하여 식 (5)에 의하여 정전 용량을 계산한다. 계산된 정전 용량을 이용하여 X 변위를 계산하면 식 (9)와 같이 표현된다. 이때 정규화된 공극 주기 오차는 식 (10a)와 같이 유도되며 홀수 주기 형상 오차의 경우 편심 각도 β 에 관계없는 오차와 편심 각도의 2 배수에 관련된 오차로, 짝수 주기 형상 오차는 편심 각도의 1 배수에 관련된 오차로 나타난다. 그리고, $\alpha^2 \ll bt$ 이므로 편심 각도의 2 배수에 관련된 오차는 매우 작고 식 (10b)와 같이 간략화될 수 있다.

$$X = \frac{4 \sin \zeta}{\pi t \left(1 - \frac{t}{4b} + \frac{\alpha^2}{2bt} \right)} \left[\alpha \cos \beta + X_{err} \right] \quad (9)$$

$$X_{err} = -\frac{\alpha^2}{16b\delta} \sum (1 - (-1)^m) \frac{\sin(m \pm 2)\zeta}{(m \pm 2)\sin \zeta} \Delta\delta_\theta^m \cos(2\beta \pm m\gamma_m) - \frac{\alpha}{4\delta} \sum (1 + (-1)^m) \frac{\sin(m \pm 1)\zeta}{(m \pm 1)\sin \zeta} \Delta\delta_\theta^m \cos(\beta \pm m\gamma_m) - \left(1 - \frac{t}{4b} + \frac{\alpha^2}{2bt} \right) \frac{t}{4\delta} \sum (1 - (-1)^m) \frac{\sin m\zeta}{m \sin \zeta} \Delta\delta_\theta^m \cos m\gamma_m \quad (10a)$$

$$\approx \begin{cases} -\frac{\alpha}{2\delta} \sum \frac{\sin(m\pm 1)\zeta}{(m\pm 1)\sin\zeta} \Delta\delta_\theta^m \cos(\beta \pm m\gamma_m), m = \text{even} \\ -\frac{t}{2\delta} \sum \frac{\sin m\zeta}{m\sin\zeta} \Delta\delta_\theta^m \cos m\gamma_m, m = \text{odd} \end{cases} \quad (10b)$$

원주방향 공극 오차 중 1주기 와 2주기 오차의 영향 $\left(-\frac{t}{2\delta} \Delta\delta_\theta^1 \cos\gamma_1, -\frac{\alpha}{2\delta} \Delta\delta_\theta^2 \cos(\beta \pm 2\gamma_2)\right)$ 은 센서의 각도

크기 ζ 를 변화시켜 제거되지 않는다. 1주기 오차는 센서 설치 시 발생하는 센서와 대상체의 기울어짐이며, 2주기 오차는 센서나 대상체가 휨 경우이다. 설치 시 기울어짐은 완벽한 제거가 어렵지만 센서나 대상체가 휨 경우는 제작의 정밀도를 높여 줄일 수 있다. 또한, 센서 전극의 각도를 조절하면 원주 방향 공극 오차 중 원하는 몇몇 주기 오차를 제거할 수 있다. 예로 $\zeta = 60^\circ$ 일 경우 2 주기와 3주기의 영향 $\left(-\frac{\alpha}{2\delta} \Delta\delta_\theta^2 \frac{\sin 3\zeta}{3\sin\zeta} \cos(\beta \pm 2\gamma_2), -\frac{t}{2\delta} \Delta\delta_\theta^3 \frac{\sin 3\zeta}{3\sin\zeta} \cos\gamma_3\right)$ 이 제거 된다.

Table 1에 정리된 센서 및 대상체 사양으로 기울어짐 위상 $\gamma_m = 0$ 일 때 주기 오차에 대한 영향을 수치 계산하여 Fig. 6에 나타냈다. 홀수 주기 오차는 옅색 오차를 발생시키며 짝수 주기 오차는 대상체 편심에 비례하는 오차를 발생시킨다. 짝수 주기 오차는 홀수주기 오차에 비해 매우 작고 오차 주기가 커질수록 평균화 효과로 그 영향이 줄어든다.

Table 1 Specifications of the simulation sensor model

Parameter	b	δ	ζ	t	$\Delta\delta^m$
Value	20mm	2mm	$\pi/4$	5.25 mm	$\delta/100$

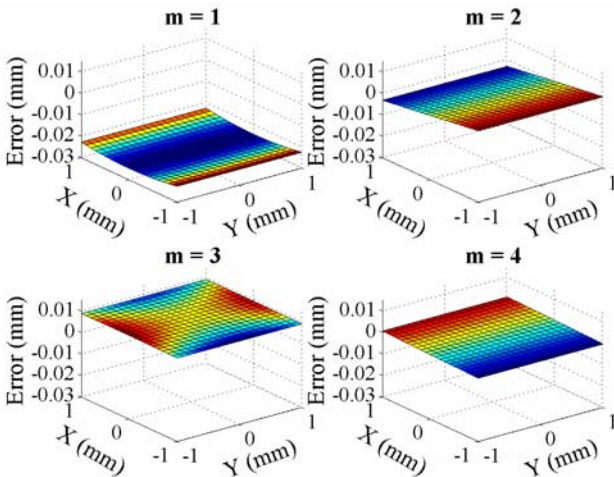


Fig. 6 Effect of the harmonic tangential air gap errors

(2) 반경 방향 공극 오차

원주 방향 오차와 동일하게 식 (11)과 같이 반경 방향 오차 또한 푸리에 급수로 표현할 수 있다.

$$\delta_r = \delta + \sum \Delta\delta_r^m \cos \frac{2\pi m}{t} (r-b) \quad (11)$$

앞의 원주 방향 공극 오차와 동일한 방법으로 테일러 급수 전개 후 식 (5)에 의하여 정전 용량을 계산하면 정전용량은 급수로 식 (12)와 같이 나타낼 수 있지만 현시적 표현은 불가능하다.

$$X_{err}^r \approx \sum \frac{t}{\pi\delta} \frac{\delta_r^m}{m\sin\zeta} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} \left(\frac{2\pi\alpha m}{t}\right)^{2k+1} \sum_{l=0}^k \frac{1}{2^{2k+1}} \binom{2k+1}{l} \frac{\sin(2k-2l+1)\zeta}{(2k-2l+1)} \cos(2k-2l+1)\beta \quad (12)$$

위의 식에서 $\sum_{l=0}^k \frac{1}{2^{2k+1}} \binom{2k+1}{l} \frac{\sin(2k-2l+1)\zeta}{(2k-2l+1)} \cos(2k-2l+1)\beta$ 은 (ζ 와 β 가 모두 0이고 k 가 0인 경우) 최대값 0.5 를 가지고 k 가 늘어날수록 지수적으로 줄어든다. 따라서 (13)과 같이 근사하여 대략 오차의 경향을 살펴 볼 수 있다. 반경 방향 공극 오차의 영향이 원주 방향 공극 오차에 비하여 작게 나타남을 확인할 수 있다.

$$X_{err}^r \ll \sum \frac{t}{2\pi\delta} \frac{\delta_r^m}{m} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)!} \left(\frac{2\pi\alpha m}{t}\right)^{2k+1} \quad (13)$$

$$= \frac{t}{2\pi\delta} \frac{\delta_r^m}{m\sin\zeta} \cos \frac{2\pi\alpha m}{t}$$

Table 1 사양을 이용해 수치적으로 오차의 주기에 따른 영향을 계산하여 Fig. 7에 나타냈다. 평균화 효과가 확연히 보여지며 반경 방향 오차는 그 영향이 원주 방향 오차보다 그 영향이 작고 실제 제작할 때 잘 나타나지 않는다.

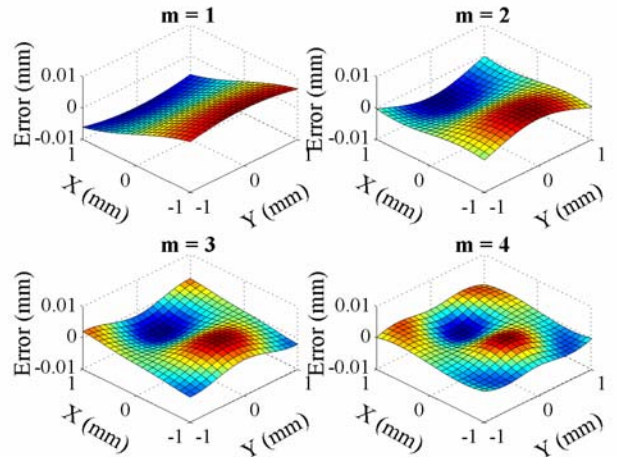


Fig. 7 Effect of the harmonic radial air gap errors

3.2 대상체 진원도 오차

가공 오차로 인한 대상체의 진원도 오차 또한 푸리에 급수로 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta b = \sum \Delta b^m \cos m(\theta - \beta) \quad (14)$$

공극 오차와 같은 방법으로 정전 용량을 계산하여 구한 X 방향 변위의 오차는 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} X_{err}^b &= \frac{\alpha}{4b} \sum (1 + (-1)^m) \frac{\sin(m \pm 1)\zeta}{(m \pm 1)\sin \zeta} \cos(m \pm 1)\beta \\ &+ \frac{1}{2} \sum (1 - (-1)^m) \frac{\sin m\zeta}{m \sin \zeta} \Delta b^m \cos m\beta \quad (15) \\ &\approx \frac{\sin m\zeta}{m \sin \zeta} \Delta b^m \cos m\beta, m = \text{odd} \end{aligned}$$

진원도에 의한 오차는 원주 방향 공극 오차와 유사한 경향을 보인다. 형상 오차가 주변 주기로 전파되지만 그 영향이 작아 오차 주기의 영향만으로 근사 할 수 있다. Table 1 사양으로 오차의 주기에 따른 영향을 수치적으로 계산하여 Fig. 8에 나타냈다. 진원도 오차의 영향이 홀수 주기에서 더 크게 나타나지만 1주기 오차의 경우 대상체의 수평 방향 움직임으로 오차라 볼 수 없다. 또한 3주기 진원도 오차는 센서 각도 $\zeta = 60^\circ$ 일 경우 크게 줄일 수 있다.

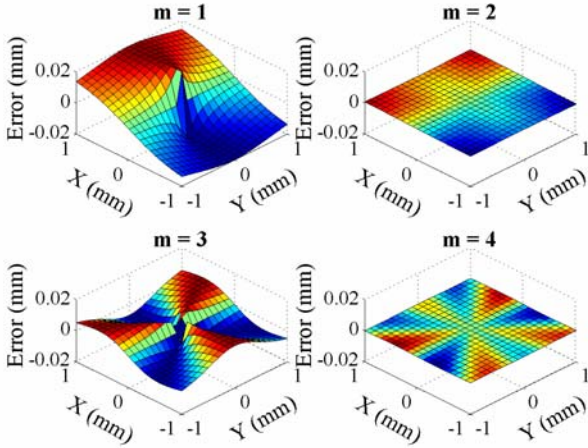


Fig. 8 Effect of the harmonic target roundness error

3.3 센서 설치 시 발생하는 기울어짐 오차

센서 설치 시에 대상체와 완벽히 평행하게 설치하는 것은 불가능하다. 센서와 대상체 사이 기울어짐은 반경 및 원주 방향 공극에 영향을 주고 이는 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta_\phi = \delta + \Delta\delta_\phi, (\Delta\delta_\phi = r \tan \phi \cos(\theta + \gamma_\phi)) \quad (16)$$

여기서 ϕ 는 기울어짐 각도이고 γ_ϕ 는 기울어짐 오차의

위상이다.

다른 오차들과 같은 방법으로 기울어짐 오차에 따른 X 방향 변위의 오차를 계산한 결과는 식 (17)과 같다. 비록 대상체 편심에 의한 영향이 있지만 편심량이 반경에 비하여 매우 작으므로 좀더 간략화 할 수 있다. 간략화된 기울어짐 오차의 영향은 1주기의 원주방향 공극 오차와 일치하며 오차 중에서 가장 큰 영향을 가지기 때문에 이를 꼭 제거해야 한다.

$$\begin{aligned} X_{err}^\phi &= \frac{\alpha^2}{4\delta} \tan \phi \left(2 \cos \gamma_\phi + \cos(2\beta + \gamma_\phi) + \frac{\sin 3\zeta}{3 \sin \zeta} (2\beta - \gamma_\phi) \right) \quad (17) \\ &+ \frac{b^3 - (b-t/2)^3}{3b\delta} \tan \phi \cos \gamma_\phi \approx \frac{t}{2\delta} \tan \phi \cos \gamma_\phi \end{aligned}$$

4. 원판형 센서의 설계

4.1 형상 오차 영향의 비교

형상 오차에 의한 측정 변위 오차를 정량적으로 분석하기 위해 오차 증폭 계수 (Error amplification factor: EAF)를 식 (18)과 같이 정의한다. [9]

$$EAF = \frac{X_{err}|_m}{\Delta\delta^m} \quad (18)$$

X_{err} 은 형상 오차에 의한 측정 오차 이고 $\Delta\delta^m$ 는 형상오차를 나타낸다. 즉, 오차 증폭 계수는 형상오차가 실제 측정에 어떠한 영향을 주는지 나타내는 지표이다. 앞서 분석한 여러 형상오차의 오차 증폭 계수를 Table 2에 정리하였다.

Table 2 EAF of various geometric errors

Geometric errors	EAF
Tangential air gap	$\frac{t \sin m\zeta}{2\delta m \sin \zeta}$ m : odd
	$\frac{\alpha \sin(m \pm 1)\zeta}{2\delta (m \pm 1)\sin \zeta}$ m : even
Radial air gap	$\ll \frac{t}{2\delta} \frac{1}{\pi m \sin \zeta} \cos \frac{2m\pi\alpha}{t}$
Target roundness	$\frac{\sin m\zeta}{m \sin \zeta}$, m : odd
Sensor installation	$\frac{t}{2\delta}$

센서 각도의 크기가 커지고 오차 주기가 높아질수록 오차증폭계수가 줄어든다. 주기 별로 살펴보면 1주기 오차가 가장 큰데 이것은 센서와 대상체 사이의 기울어짐이며 센서 각도 크기 조정으로 제거할 수 없다. 앞에서 언급하였듯이 센서 각도 크기를 60° 로 정하면 2주기 오차의 일부와 3주기 오차가 상당부분 제거된다.

4.2 센서 설치 시의 기울어짐 오차 보상

대상체가 작은 경우 기울어짐까지 측정하는 최적화된 센서의 형상을 Fig. 9에 나타내었다.

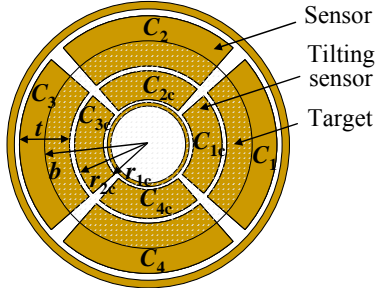


Fig. 9 Modified disk-type capacitive sensor

기울어짐 측정 센서 조각을 각각 C_{1c} 에서 C_{4c} 라고 하고 그 내경과 외경을 각각 r_{1c} 과 r_{2c} 라고 하면 센서의 출력은 식 (19)와 같다.

$$X_c = \frac{(C_{1c} - C_{3c})}{C_{1c} + C_{2c} + C_{3c} + C_{4c}} \quad (19)$$

$$= \frac{4}{3\pi\delta} \frac{r_{1c}^2 + r_{1c}r_{2c} + r_{2c}^2}{r_{1c} + r_{2c}} \sin\zeta \tan\phi \cos\gamma_\phi$$

따라서 센서 설치 시에 발생하는 기울어짐은 식 (10)과 (19)을 이용해 식 (20)과 같이 보상한다.

$$X_{true} = X - \frac{3}{2} \frac{b(r_{1c} + r_{2c})}{r_{1c}^2 + r_{1c}r_{2c} + r_{2c}^2} X_c \quad (20)$$

4.3 센서 제작

앞의 오차 분석을 통해 Fig. 10과 같은 원판형 정전용량 센서를 제작하였다. 비공유 센서 전극 4개와 X, Y 방향 측정시 공유하는 센서 전극 4개로 이루어져 센서 측정 각도 ζ 가 60° 가 되도록 하였다 [8]. 집지 층, 가드 층, 센서 전극 층 순서로 인쇄 회로 기판을 제작했고 측정 시 노출된 배선부에 의한 기생 정전용량 방지를 위해 배선 위 쪽에 가드를 추가했다.

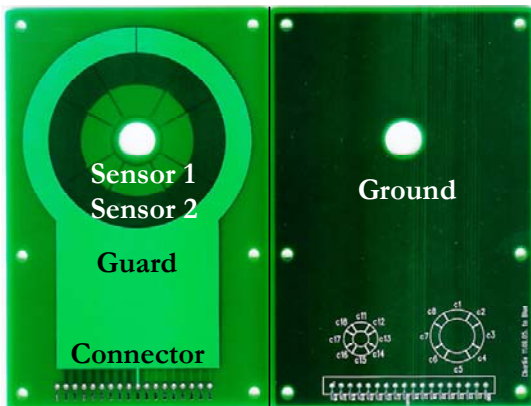
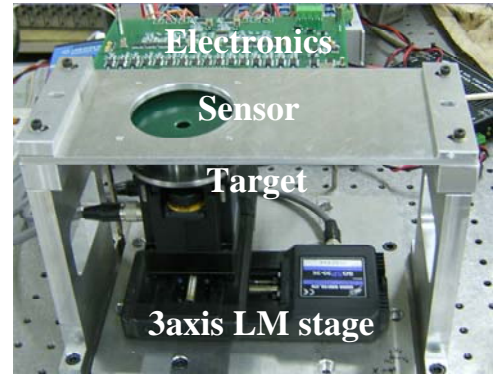


Fig. 10 PCB sensor

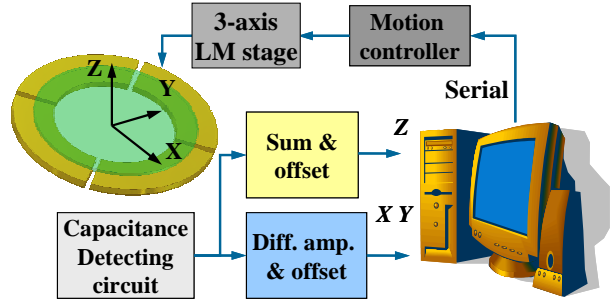
5. 실험

5.1 실험장치

제작된 센서의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 11의 실험 장치를 구성하였다. 실험장치는 모터구동 XYZ스테이지, 모터 제어기, 모터 구동 드라이버, 센서와 대상체를 고정하기 위한 지지대로 구성된다. 실험에 사용된 대상체는 Fig. 12에 나타냈다.



(a) Test rig and stage setup



(b) Schematic diagram

Fig. 11 Experimental setup



Fig. 12 Sensor target

5.2 실험결과

X와 Y 변위를 각각 -3.5 mm에서 3.5 mm까지 0.5 mm 단위로, Z 변위는 0.3 mm에서 1.8 mm까지 0.3 mm 단위로 변화시키며 센서의 출력을 측정했다. 우선 대상체와 센서 사이의 공극이 0.6 mm와 1.2 mm일 때 C_z 를 이용한 센서와 대상체 사이 공극 보상 이전의 측정값을 Fig. 13과 14에 나타냈다. 센서와 대상체 사이 공극의 보상이 없기 때문에 센서 출력의 이득이 크게 변한다.

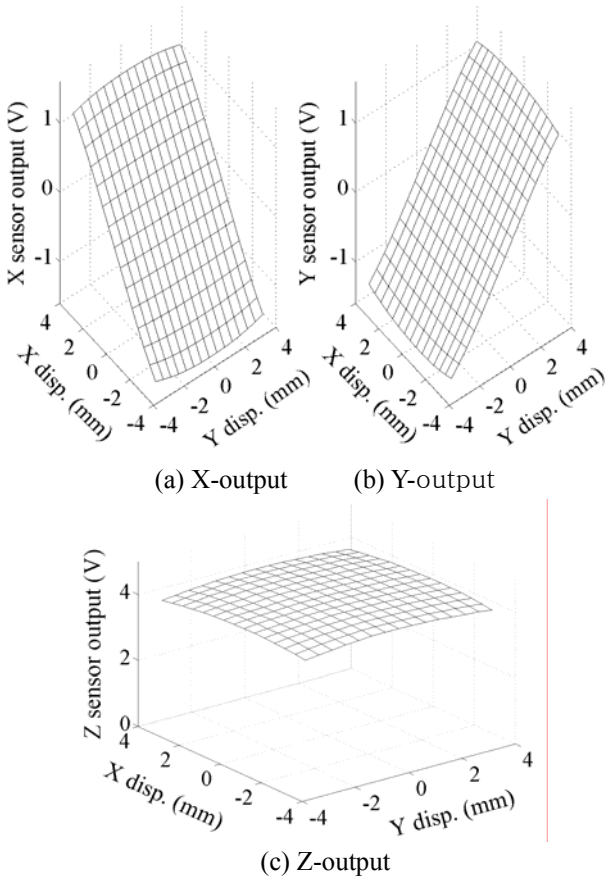


Fig. 13 Raw X,Y and Z sensor outputs at Z = 0.6 mm

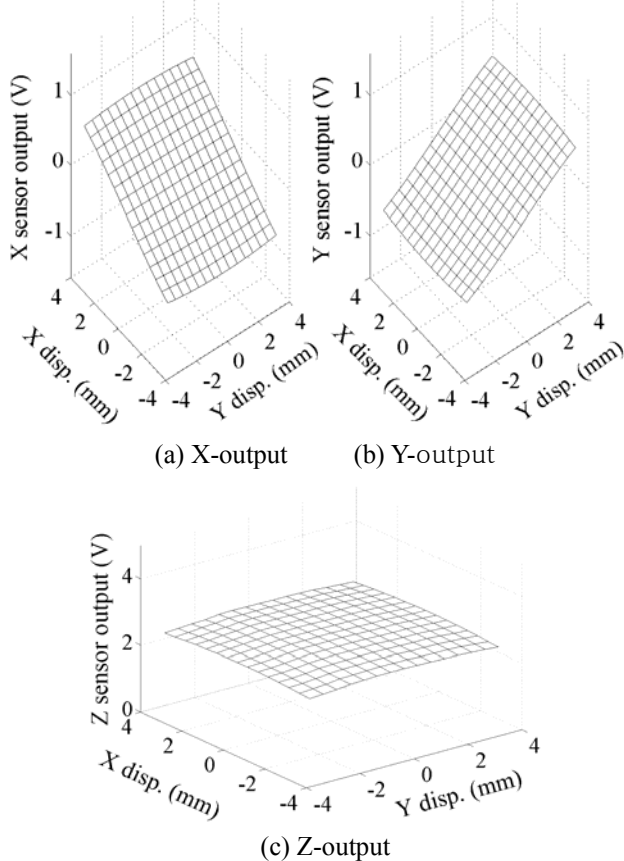


Fig. 14 Raw X,Y and Z sensor outputs at Z = 1.2 mm

센서와 대상체 사이 공극이 변화함에 따라 X, Y 변위는 공극과 상관없이 측정해야 하므로 이를 보상하기 위해 식 (1)과 같이 C_z 로 각 방향 수평 방향 출력을 나누면 Fig. 15와 같이 공극 변화에도 큰 차이 없이 비교적 일정한 결과를 얻을 수 있다. 하지만, 초기의 센서와 대상체 사이 기울어짐 오차로 인해 측정오차가 발생하고 특히 해석 결과에서 보듯이 옅섯 오차가 크게 발생한다.

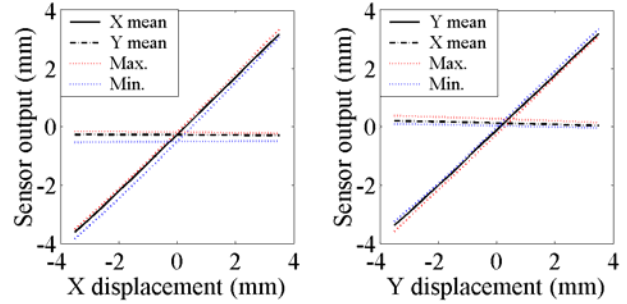


Fig. 15 X and Y outputs before compensation

Z 방향 측정 결과는 Fig. 16에 나타내었으며 측정 범위에서 우수한 선형성을 가짐을 알 수 있다. 대상체가 센서와 멀어지면서 상대적으로 오차가 커지는데 이는 정전용량 값이 변위에 반비례하기 때문이다

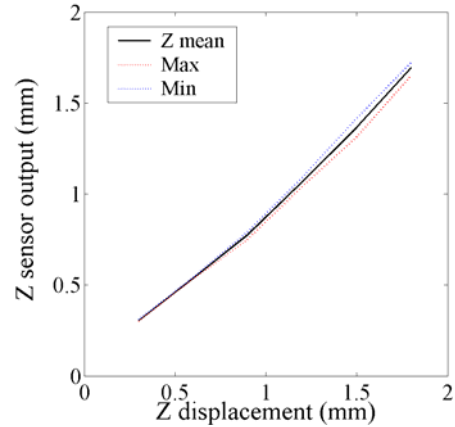


Fig. 16 Z sensor output

센서 설치 시 발생하는 기울어짐 오차를 제거하기 위하여 기울어짐 측정 센서로 식 (20)와 같이 측정값을 보상한다. 보상한 후 X와 Y 방향 측정 값을 Fig. 17에 나타내었다. Figure 15의 결과에 비해 측정 오차가 크게 줄었고 특히 옅섯 오차가 현저하게 줄어들었다. 식 (20)의 방법으로 센서와 대상체 사이 기울어짐을 보상했을 때 상대 선형 오차의 변화를 Table 3에 정리하였다. 옅섯 오차가 현저하게 줄어들 뿐 아니라 선형 오차도 상당히 줄어든다.

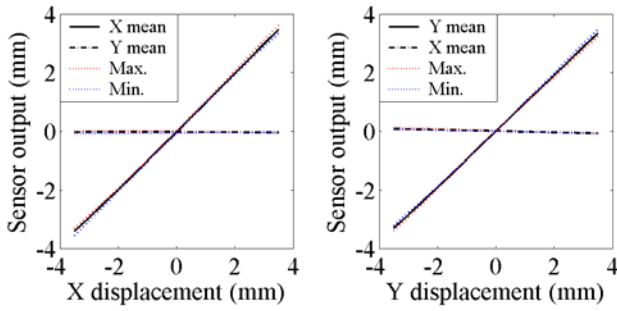


Fig. 17 X and Y outputs after compensation

Table 3 Tilting compensation results

Axis	Compensation	Relative error		
		X	Y	Offset
X	Before	4.85%	5.34%	7.40%
	After	2.99%	1.40%	0.98%
Y	Before	4.05%	4.78%	3.74%
	After	0.97%	2.63%	0.30%

6. 결론

본 연구는 5차원 변위 측정을 위한 원판형 정전용량 센서에 관한 것이다. 개발된 센서는 면적 변화에 따른 정전용량 변화를 측정하기 때문에 넓은 측정 범위를 가지고, 인쇄 회로 기판으로 제작 가능하므로 제작 시의 노력과 비용을 크게 줄일 수 있다. 개발된 센서의 측정 과정을 수학적으로 모델링하고 여러 형상 오차가 측정에 미치는 영향에 대한 분석하였다. 이러한 오차 분석을 기반으로 개발된 센서의 설계 기준을 제시하였고 변위 측정 시 가장 문제가 되는 센서 설치 오차를 보상할 수 있는 방법을 제안했다. 인쇄 회로 기판으로 원판형 정전용량 센서를 제작하고 자동화된 XYZ이송장치로 변위 측정 시험을 수행하였고 개발된 센서를 통하여 5차원 변위 측정과 기울어짐에 따른 오차 보상이 가능함을 실험적으로 확인하였다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비의 지원과 학술진흥재단의 신진 교수 연구 지원 사업의 지원으로 수행되었음에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, O.S., Lee, S.H. and Han, D.C., 2003, "Positioning performance and straightness error compensation of the magnetic levitation stage supported by the linear magnetic bearing," IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 50(2), pp. 374-378.
- (2) Kim, O.S., Lee, S.H. and Han, D.C., 2003, "Positioning performance and straightness error compensation of the magnetic levitation stage supported

by the linear magnetic bearing," IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 50(2), pp. 374-378.

(3) Schweitzer, G., Bleuler, H., and Traxler, A., 1994, Active Magnetic Bearings: Basics, Properties and Applications of Active Magnetic Bearings, Zurich, Switzerland: V.D.F edition.

(4) Ahn, H.J. and Han, D.C., 2003, "System Modeling and Robust control of an AMB spindle : Part II Mu controller design and implementation" KSME international, 17(12), pp. 1844-1854.

(5) Ahn, H.J. and Han, D.C., 2003, "System Modeling and Robust control of an AMB spindle : Part I Modeling and validation for robust control" KSME international, 17(12), pp. 1855-1866.

(6) Kolb, P.M., Decca, R.S. and Drew, H.D., 1998, "Capacitive sensor for micropositioning in two dimensions", Rev. Sci. Instrum., Vol. 69(1), pp. 310-312.

(7) Peters, R.D. and Seibt, P.J., 1992, "An inexpensive synchronous detector and its application to differential capacitance sensors", Rev. Sci. Instrum., Vol. 63(8), pp. 3989-3992.

(8) Chapman, P. D., 1985, "A capacitance based ultra-precision spindle error analyser", Precision Engineering, Vol. 7(3), pp.129-137.

(9) Ahn, H. J., Jeon, S., Han, D.C., 2000, "Error analysis of the cylindrical capacitive sensor for active magnetic bearing spindles," Journal of Dynamics systems, measurement, and control, trans. of ASME, Vol. 122, pp.102-107.

(10) Jeon, S., Ahn, H.J., Chang, I.B. and Han, D.C., 2001, "A 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.

(11) Ahn, H.J., Han, D.C. and Hwang, I.S., 2003, "A built-in bearing sensor to measure the shaft motion of a small rotary compressor for air conditioning", Tribology International, Vol. 36(8), pp 561 - 572.

(12) Ahn, H.J., Kim, Il-Hae and Han, Dong-Chul, 2005, "Nonlinear analysis of cylindrical capacitive sensor", Meas. Sci. Technol. 16, pp. 699-706.

(13) 심치형, 2006, "3 차원 변위 측정을 위한 원판형 정전용량 센서", 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석사 학위 논문.