

◆특집◆ IT 활용을 통한 제어 시스템의 기술발전과 나노 정밀도 구현방안

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

김종혁\*, 안형준\*, 장동영\*\*

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

Jong Hyuk Kim\*, Hyeong Joon Ahn\* and Dong Young Jang\*\*

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 반경방향 및 축 방향 변위센서의 충분한 설치공간이 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 형

상으로 인해 센서의 설치와 보정이 어렵다.

주축 변위 측정에 가장 많이 이용되는 상용 프루브 형의 변위센서는 주축의 표면 품질에 큰 영향을 받는다. 따라서, 측정된 변위신호로부터 주축 표면의 기하학적 오차로 인한 불필요한 신호 성분을 제거하기 위한 별도의 신호처리 알고리즘이 필요하게 된다. 이러한 프루브 형상의 대안으로서 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<sup>1,2</sup>.

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 정밀도를 가지기 위한 설계 법을 제안하였다. 개발된 센서를 구동하기 위한 앰프와 실험 장치를 제작하였으며, 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하여 제안된 센서의 실제 적용 가능성을 검증하였다. 제안된 센

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 서울산업대학교 산업정보시스템공학과

Tel. 02-970-6475, Fax. 02-971-6475

Email mail2saber@gmail.com

공작기계 특히, 공작기계의 주축, 가공상태 모니터링 및 센서 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

서는 상대적으로 좁은 설치 공간을 필요로 하기 때문에, 주축 시스템의 설계에 있어 기존의 변위 센서를 사용하는 것보다 단순화된 설계와 유연한 설계를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

### 2. 원통형 정전용량 변위센서 (CCS)

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

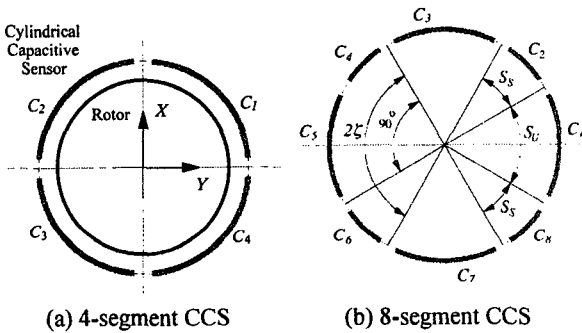


Fig. 1 The cylindrical capacitive sensors

Fig. 1(a)의 기존의 4 조각 CCS 는 최대한 높은 분해능을 얻기 위하여 측정 면적을 최대화한 형태이다. 회전축의 변위는 4 개의 각 센서 전극의 정전용량 ( $C_1, C_2, C_3, C_4$ ) 를 이용하여 식 (1)의 형태로 근사화할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_{CCS4} &= gain(C_1 + C_4 - C_2 - C_3), \\ Y_{CCS4} &= gain(C_1 + C_2 - C_3 - C_4) \end{aligned} \quad (1)$$

그러나, 4 조각 CCS 는 높은 분해능을 갖는 반면, 홀수 주기의 조화 오차, 특히 회전축 형상 오차의 3 주기 조화 성분의 오차에 민감하다. 이러한 4 조각 CCS 의 단점을 보완하기 위하여, 전수 등<sup>2</sup> 은 Fig. 1 (b)와 같이 4 개의 공유전극과 4 개의 비공유전극을 가진 8 조각의 새로운 형태의 8 조각 CCS 를 제안한 바 있다. 센서 유닛의 전체 각도의 크기  $2\zeta$  는 두 개의 공유 센서 전극과 한 개의 비공유 센서 전극의 합으로 나타낼 수 있다.

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

여기서,  $S_S$  와  $S_U$  는 각각 공유전극과 비공유전극의 각도 크기이다.

회전축의 변위는 식 (3)과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_{CCS8} &= gain(C_8 + C_1 + C_2 - C_4 - C_5 - C_6), \\ Y_{CCS4} &= gain(C_2 + C_3 + C_4 - C_6 - C_7 - C_8) \end{aligned} \quad (3)$$

8 조각 CCS 는 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. 반경방향 및 축방향 운동의 동시 측정을 위한 새로운 CCS

Fig. 2(a)는 CCS 의 단면을 나타내며, 기존 CCS 의 사용하지 않는 축 방향 단면을 보여준다. Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 축 방향 운동의 측정에 CCS 의 축 방향 면을 이용하는 것이 새로운 CCS 의 아이디어이다. 만일 이러한 구상이 성공적으로 구현이 된다면 회전축 설계 시 별도의 축 방향 센서가 필요 없게 되어 더욱 조밀한 설계와 시스템의 단순화가 가능해 질 것이다.

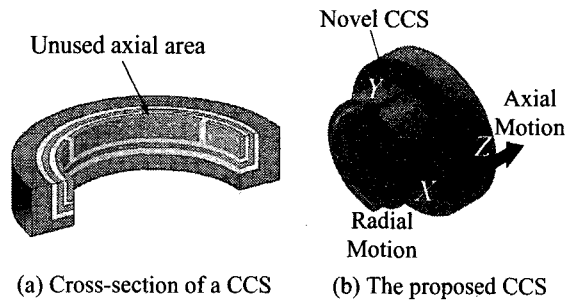


Fig. 2 The idea of the novel CCS

본 논문에서 제안한 CCS 의 경우 각각의 전극의 정전용량은 식 (4)와 같이 축 방향과 반경방향 두 개의 향으로 나누어 질 수 있다. 축 방향 측정면의 정전용량  $C_{ia}$  는 CCS 가 차동 형태(differential configuration)를 이루기 때문에 상쇄될 수 있으므로, 반경방향의 변위는 식 (1), (3)과 동일한 식을 사용하여 근사화 될 수 있다.

$$C_i = C_{ir} + C_{ia} \quad (4)$$

여기서,  $C_{ia}$ 는 축 방향 측정 면의 정전용량이며  $C_{ir}$ 은 반경방향 측정 면의 정전용량을 나타낸다.

만약,  $b$ 는 센서의 반경, 센서 전극의 반경방향 두께를  $t$ 라하고 축 방향 틈새를  $\delta_a$ 라하면, 축 방향 면의 정전용량의 합은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sum_i C_{ia} = \varepsilon \frac{2\pi(b+t/2)t}{\delta_a} \quad (5)$$

그리고, 만일 반경방향 정전용량  $C_{ir}$ 의 합이 일정하다면 축 방향 변위에 의한 정전용량은 식 (6)과 같이 센서 전극의 모든 정전용량의 합으로 표현될 수 있다. 그러나 회전축이 CCS의 중심에서부터 멀어질수록 반경방향 정전용량의 합(전체 반경방향 정전용량)은 회전축의 편심량에 따라 현저하게 변화한다. 그러므로 전체 반경방향 정전용량의 위치에 대한 종속관계를 고려할 필요가 있다.

$$C_z = \sum_i C_i - C_{offset} \quad (6)$$

여기서,  $C_{offset}$ 은 반경방향 및 공전 정전용량에 의한 부가 정전용량을 나타낸다.

CCS의 반경방향 측정 면의 미소 정전용량은 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\Delta C = \frac{ebw}{\delta - \alpha \cos(\theta - \beta)} \Delta \theta \quad (7)$$

여기서,  $w$ 는 센서의 축 방향 폭,  $\delta$ 는 센서와 회전축 사이의 반경방향 틈새,  $\alpha$ 는 회전축의 편심량 그리고  $\beta$ 는 회전축 편심량의 위상각이다.

회전축의 반경방향 위치에 따른 전체 반경방향 정전용량의 비선형 종속성은 적분표<sup>3</sup>를 이용하여 식 (7)을 0에서  $2\pi$ 까지 적분함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$C_{0 \dots 2\pi} = \int_0^{2\pi} \Delta C = \frac{2\pi ebw}{\delta} \frac{1}{\sqrt{1 - (\alpha/\delta)^2}} \quad (8)$$

회전축이 CCS에 가까워질수록 비선형 특성은 더욱 커진다. AMB의 경우 보조베어링의 틈새가 공칭 틈새의 약 75% 정도라면 전체 정전용량은 150% 이상 변화하게 된다. 다시 말해, 축 방향 운동을 나타내기 위해서 정전용량의 합을 직접적으로 이용할 수 없다는 것을 의미한다. 즉, 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 특성

각도 크기  $2\zeta$ 의 CCS에 의해 측정된 변위  $X$ 는 다음과 같다.

$$X_{CCS} = \int_{-\zeta}^{\zeta} \Delta C - \int_{\pi-\zeta}^{\pi+\zeta} \Delta C \quad (9)$$

식 (7)의 미소 정전용량은 멱급수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta C = \frac{ebw}{\delta} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{\alpha}{\delta} \cos(\theta - \beta) \right)^n \Delta \theta \quad (10)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하여 적분하면, 그 해는 오직  $n$ 이 짝수일 때만 존재한다.

$$X_{CCS} = \frac{2ebw}{\delta} \int_{-\zeta}^{\zeta} \sum_{l=0}^{\infty} \left( \frac{\alpha}{\delta} \right)^{2l+1} \cos^{2l+1}(\theta - \beta) \Delta \theta \quad (11)$$

다음 식 (12)의 삼각함수 관계를 이용하면, 측정된 회전축의 변위는 식 (13)과 같이 단순화할 수 있다.

$$\cos^{2l+1} \theta = \frac{1}{4^l} \sum_{k=0}^l \binom{2l+1}{k} \cos(2l+1-2k)\theta \quad (12)$$

$$X_{CCS} = 8 \frac{ebw}{\delta} \sum_{l=0}^{\infty} \left( \frac{\alpha}{2\delta} \right)^{2l+1} \sum_{k=0}^l \binom{2l+1}{k} \frac{\sin(2l+1-2k)\zeta}{2l+1-2k} \cos(2l+1-2k)\beta \quad (13)$$

CCS의 반경 방향 운동 측정 시 조화 오차 성분들이 존재하며 가장 큰 조화 오차는 3 주기 비

선형 조화 성분이고, 이는  $\zeta$  가 60 라면 제거 가능하다. 더욱이 CCS 의 비선형 평균 이득은 1 주 기 조화 항의 합으로부터 계산 가능하다.

$$X_{CCS}^1 = 8 \frac{ebw}{\delta} \sum_{l=0}^{\infty} \left( \frac{\alpha}{2\delta} \right)^{2l+1} \binom{2l+1}{l} \sin \zeta \cos \beta \quad (14)$$

식 (14)는 멱급수를 이용하여 단순화할 수 있고 CCS 의 비선형 평균 이득은 정규화된 편심량의 함수인 식 (15)로 표현될 수 있다.

$$X_{CCS}^1 = 8 \frac{ebw}{\delta} \alpha \left( \frac{1}{\sqrt{1-(\alpha/\delta)^2}} - 1 \right) \sin \zeta \cos \beta \quad (15)$$

### 3.2 보상 기법

전체 반경 방향 정전용량의 부가 비선형성 (additive nonlinearity)은 식 (16)과 같이 표현될 수 있고 이는 역시 정규화된 편심량의 함수이고 식 (15)의 비선형 평균 이득과 매우 유사한 형태이다.

$$C - C_{\alpha=0} = \frac{2\pi ebw}{\delta} \left( \frac{1}{\sqrt{1-(\alpha/\delta)^2}} - 1 \right) \quad (16)$$

보상 기법의 개념은 다음 식과 같이 반경방향 운동의 측정을 이용하여 부가 비선형성을 보상한다는 것이다.

$$C_Z = \sum_i C_i - a \sqrt{X_{CCS}^2 + Y_{CCS}^2} - C_{offset} \quad (17)$$

식 (18)에서 제안된 보상 기법은 아날로그 회로로 구현하기에 매우 복잡하다. 더욱이 회전축이 CCS 의 중심에 근접해 있다면 보상 오차는 매우 작을 것이므로 다음 식으로 단순화될 수 있다.

$$C_Z = \sum_i C_i - a_m (|X_{CCS}| + |Y_{CCS}|) - C_{offset} \quad (18)$$

식 (21)을 이용하기 때문에 또 다른 오차의 원인과, 다음 식으로 유도될 수 있는 X 와 Y 변위의 절대값의 합으로써 편심량을 근사화하는 근사 이득  $a_r$  이 나타난다.

$$\min_a \left| \sqrt{X^2 + Y^2} - a_r (|X| + |Y|) \right| \quad (19)$$

식 (19)에서 최소 오차는  $y=x$  와  $y=-x$  에서 나타나는 반면, 최대 오차는 x 축과 y 축에서 나타난다. 근사 이득  $a_r$  은 다음 식과 같이 최소 오차와 최대 오차를 같게 함으로써 결정할 수 있다.

$$\sqrt{2}a_r - 1(\text{maximum}) = 1 - a_r(\text{minimum}) \quad (20)$$

근사 이득은  $a_r$  은 약  $0.8284 (= 2/(1+\sqrt{2}))$  이며, 상대 근사 오차는 약 17.16%이다. 보상 이득은 Fig. 3 (a)에 나타내었다.

정규 부가 보상 오차는 식 (21)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\left| \left( \frac{a^*}{x} - 1 \right) \left( \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} - 1 \right) \right| + \frac{a^*(1-a_r)}{x} \left( \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} - 1 \right) \quad (21)$$

여기서  $a^*$  는  $a_m/a_r$  이다.

수정된 최적의 보상 이득은  $a_m = a^* \cdot a_r$  로서 결정할 수 있다. 상대 보상 오차를 계산하여 Fig. 3(b)에 나타내었다. 수정된 보상 기법 (19)를 이용하여 구한 정규 보상 오차가 회전축이 CCS 에 가까워질수록 증가함에도 불구하고, 보상 오차는  $\alpha/\delta < 0.8$  의 범위 내에서는 그다지 심하지 않은 것을 볼 수 있다.

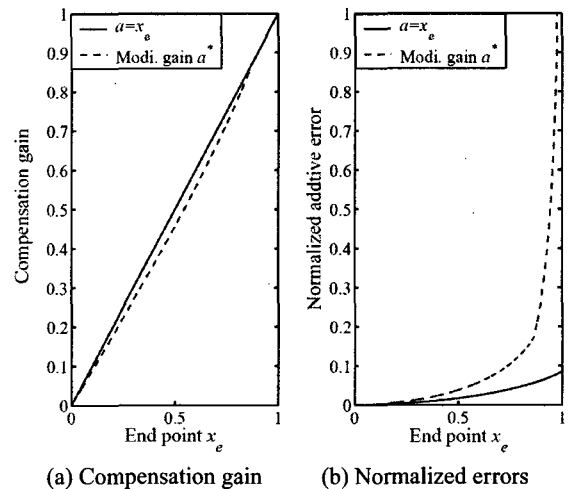


Fig. 3 Compensation method

### 3.3 유한요소해석

새로운 CCS 는 반경방향과 축방향 정전용량 사이에 간섭이 없다는 가정하에 모델링 한 것이다. 그러나 CCS 의 모서리 부분에서는 이러한 가정이 유효하지 않다. 그러므로 상용 FEM 소프트웨어 (ANSYS)를 이용하여 정전(electrostatic) 해석을 수행하였다. Fig. 4(a)는 반경 방향 틈새가 0.5 mm 이고 0.1 에서 0.9 mm 사이의 축 방향 틈새인 경우 해석 결과이다. 축 방향 전기장이 CCS 의 모서리에서 휘어지는 것을 볼 수 있다.

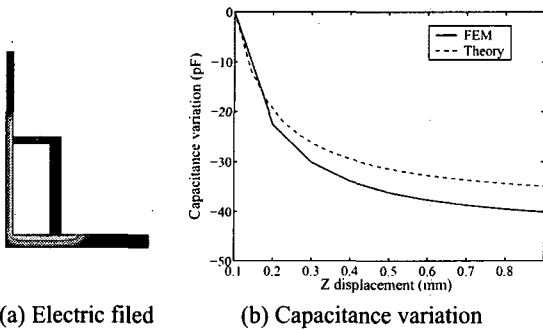


Fig. 4 FEM analysis

CCS 의 모서리 효과를 살펴보기 위해, 반경 방향 틈새가 0.5 mm 이고 축 방향 틈새가 0.1 에서 0.9 mm 인 경우에 대해 축 방향 틈새 0.1 mm 의 변화량에 대한 정전용량의 변화량을 계산하여 Fig. 4 (b)에 나타내었다. 축 방향 운동에 따른 회전축의 반경방향 면적의 증가가 축 방향 민감도의 증가에 영향을 미치지만 현저하지는 않은 것을 볼 수 있다.

## 4. 오차 해석 및 설계법

### 4.1 축 방향 측정에서의 오차 분석

제안된 CCS 의 축 방향 측정에 의한 두 가지의 본질적인 오차가 존재한다. 비선형 조화오차와 보상 오차가 그것이다. 이러한 두 가지의 오차는 축 방향 측정에서의 비선형을 초래한다. Fig. 5 는 비선형 조화 오차가 가장 큰 경우와 정규 보상 오차를 비교한 그림이다. 보상 오차가 비선형 조화 오차보다 매우 크고, 그러므로 비선형 조화 오차는 해석에서 무시한다.

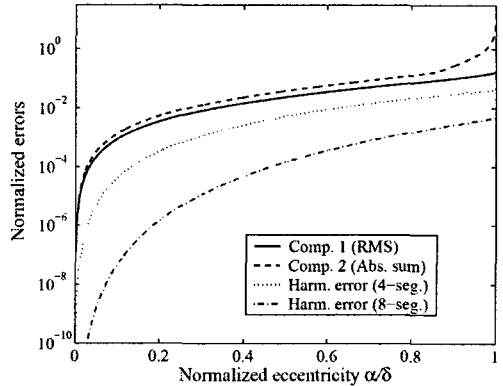


Fig. 5 Compensation and harmonic errors

$E_{comp}$  가 최대 정규 부가 보상 오차라면 축 방향 센서의 출력은 다음과 같이 단순화할 수 있다.

$$C_z = \frac{2\pi\epsilon t(b+t/2)}{\delta_a} - \frac{2\pi\epsilon bw}{\delta} E_{comp} \quad (22)$$

$$= \frac{2\pi\epsilon bw}{\delta} \left( \frac{t}{w} \frac{\delta}{\delta_a} \left( 1 + \frac{t}{2b} \right) - E_{comp} \right)$$

센서 출력으로부터 축 방향 변위를 얻기 위해 다음과 같은 역 변환(inverse conditioning)과 제곱 변환(square conditioning)의 두 가지의 신호 변환(signal conditioning) 방법을 적용할 수 있다.

$$Z_{CCS}^i = 1/C_z - 1/C_{z0} \quad (23)$$

$$Z_{CCS}^s = (C_z - C_{z0})^2$$

그리고 상대 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$RE = \frac{Z_{CCS} - Z_{CCS}^{ideal}}{Z_{CCS}^{ideal}} \quad (24)$$

축 방향 측정 오차는 CCS 의 반경방향 두께, 축 방향 폭, 축 방향 및 반경방향 틈새와 같은 기하학적 형상에 의해 좌우된다.  $t/2b$  가 매우 작기 때문에 ( $\ll 0.1$ ) 비선형 오차는 반경방향 두께와 축 방향 폭의 비  $t/w$ 에 좌우된다.

CCS 의 Z 변위가 역 변환으로부터 얻어진다면 상대 측정 오차는 다음과 같이 계산된다.

$$RE_{ax}^i = \frac{E_{comp} \cdot \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\max}}{\left( \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\max} - \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\min} \right) \left( \frac{t}{w} \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\min} - E_{comp} \right)} \quad (25)$$

또한, 제곱 변환으로부터 Z 변위를 근사화한다 면 상대 측정 오차는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$RE_{ax}^s = \frac{2E_{comp} \cdot \left( \frac{t}{w} \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\max} - \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\min} \right) - E_{comp}^2}{\left( \frac{t}{w} \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\max} - \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\min} \right)^2} \quad (26)$$

$$\approx \frac{2E_{comp}}{\frac{t}{w} \left( \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\max} - \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\min} \right)}$$

### 4.2 반경 방향 측정에서의 오차 분석

반경방향 운동 측정의 오차를 분석하는 과정이 필요하다. 반경방향 측정의 비선형 특성은 식 (15)에 표현되어 있으며 CCS 중심 근처에서의 식 (15)의 선형화된 이득은 '1'이다. 식 (27)은 중심에서의 선형화된 이득으로부터 상대 편차를 나타낸다.

$$RD_r = \frac{2}{x^2} \left( \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} - 1 \right) - 1 \quad (27)$$

여기서,  $x$ 는  $\alpha/\delta$ 이다.

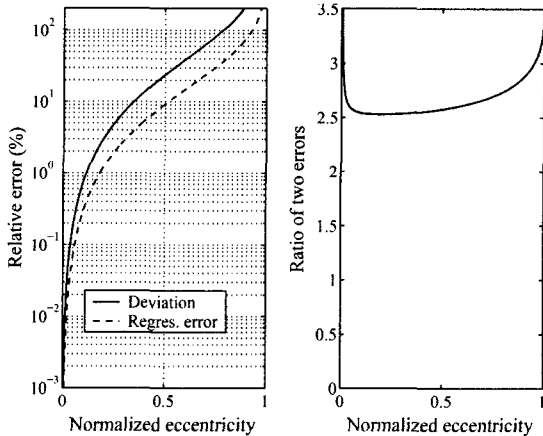


Fig. 6 Relative error of radial measurement

정규 편심량이 증가할수록 CCS의 이득은 심한 비선형성을 가진다. CCS는 작동 범위 안에서

회귀분석을 통해 검보정되므로 회귀 상대 오차와 상대 편차를 Fig. 6 (a)에 나타내었으며, Fig. 6 (b)에 그 비를 나타내었다. 0.1~0.9의 정규 편심량 사이에서는 그 비가 거의 일정하다. 그러므로 반경 방향 측정에서의 상대 오차는 최악의 경우를 고려하여 식 (28)과 같이 근사화될 수 있다.

$$RE_r(x) \leq \frac{1}{2.5} \left( \frac{2}{x^2} \left( \frac{1}{1-x^2} - 1 \right) - 1 \right) \quad (28)$$

### 4.3 설계법

CCS의 설계시 반경방향과 축 방향 측정 모두 같은 수준의 감도를 갖도록 설계하여야 하며, 반경방향과 축 방향 측정에서의 오차를 같게 함으로써 반경방향 두께와 축 방향 폭의 비  $t/w$ 라는 중요한 설계인자를 얻어낼 수 있다.

역 변환의 경우, 축 방향 폭에 대한 반경방향 두께의 비  $t/w$ 는 다음을 만족하여야 한다.

$$\left. \frac{t}{w} \right|^i = \frac{E_{comp}(x) \left( \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\max} + RE_{ra}(x) \left( \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\max} - \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\min} \right) \right)}{RE_{ra}(x) \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\min} \left( \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\max} - \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\min} \right)} \quad (29)$$

제곱 변환의 경우, 축 방향 폭에 대한 반경방향 두께의 비  $t/w$ 는 다음을 만족하여야 한다.

$$\left. \frac{t}{w} \right|^s = \frac{2E_{comp}(x)}{\left( \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\max} - \left. \frac{\delta}{\delta_o} \right|_{\min} \right) RE_{ra}} \quad (30)$$

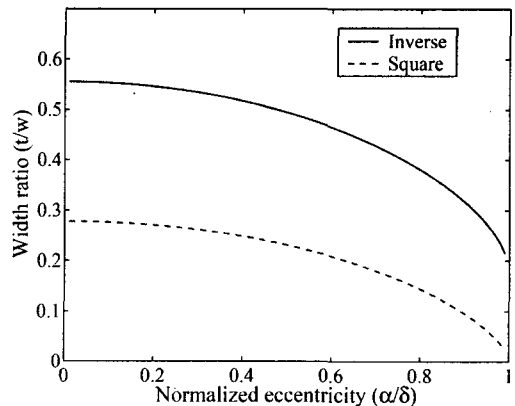


Fig. 7 Desired width ratios ( $t/w$ )

두 변환 방법을 비교하기 위하여,  $0.5 \leq \delta/\delta_0 \leq 2$  일 때 정규 편심량의 증가에 따라 식 (28)와 (29)의 폭의 비  $t/w$ 를 계산하였다. 제곱변환이 역 변환의 경우보다 보다 작은 축 방향 면적을 필요로 한다.

## 5. 시뮬레이션 및 실험

### 5.1 실험 장치 구성

제안된 CCS의 성능을 평가하기 위해서, Fig. 8 (a)와 같이 모터 구동 스테이지(Newport M-VP-25X)와 수동 Z-방향 스테이지(Sigma Koki TSD-603), 타겟과 센서 지지대로 이루어진 실험 장치를 구성하였다. Fig. 8 (b), (c)는 각각 센서와 스테이지에 조립된 타겟을 나타낸다. 센서의 제원은 다음과 같다. 직경은 54 mm, 반경방향 틈새는 0.5 mm, 센서의 축방향 길이는 6 mm, 센서의 두께는 2.5 mm 이다. 폭 비  $t/w$ 는 0.417 이다.

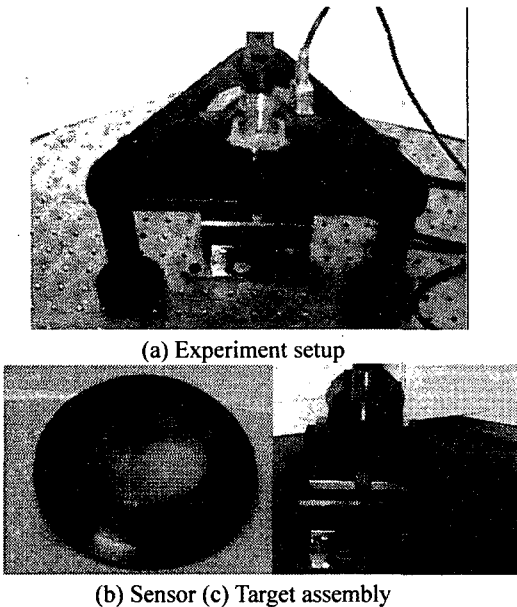


Fig. 8 Experiment setup

제안된 CCS의 회로를 Fig. 9에 나타내었다. 반경방향의 측정에는 기존의 CCS와 동일한 회로를 사용하였다. 축방향 측정 회로는 단순히 모든 정전용량들의 합과 오프셋 조절을 하도록 구성되었다.

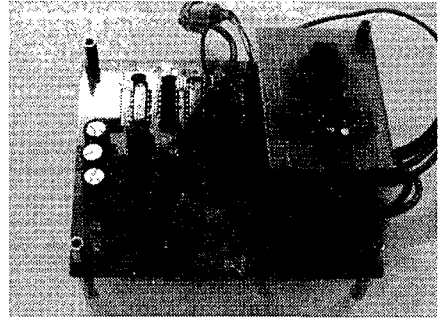


Fig. 9 Sensor circuit

실험 구성도를 Fig. 10에 나타내었다. 먼저 센서의 타겟이 없는 상태에서 CCS의 출력이 0이 되도록 CCS의 오프셋을 전기적으로 조정한다. 그리고, 반경 방향 타겟만 있는 경우 Z 센서 출력이 0이 되도록 Z 오프셋을 조정한다. 그 다음 PC와의 GPIB 통신을 통해 X, Y 방향으로 타겟을 이동하고, Z 방향 이동은 수동으로 조정하였다. (X 및 Y 방향은 0.05 mm 간격으로  $\pm 0.3$  mm, Z 방향은 0.05 mm 간격으로 0.3에서 0.95 mm까지 변화시켰다.) 스테이지의 이동에 따라 X, Y 및 Z 방향 센서 출력을 동시에 측정, 기록하였다. 최대 정규 편심량은 0.6 이고 틈새 비( $\delta/\delta_0$ )는 0.5에서 1.67까지 변화하였다.

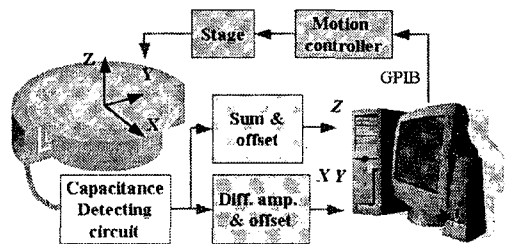
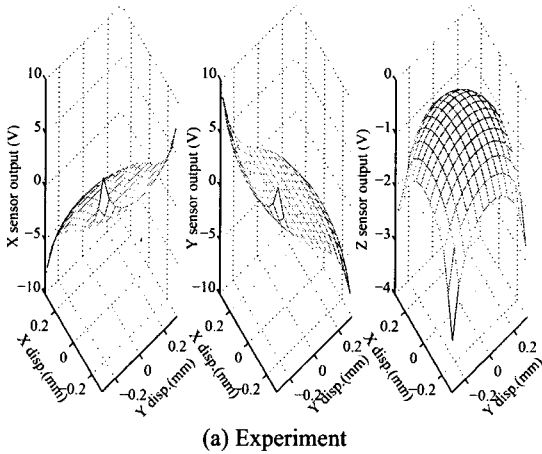


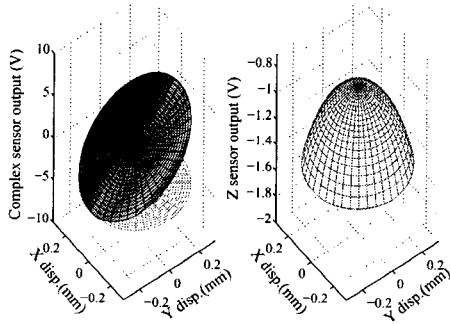
Fig. 10 Schematic of experiment

## 6. 결과

실험 결과 및 시뮬레이션 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 식 (4)와 같이 반경방향과 축방향 정전용량이 서로 독립적이라는 가정하에 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 극좌표계에 대해 수행한 반면, 실험은 직각 좌표계에 대해 수행하였다. 보상하기 전의 Z 센서의 출력은 회전축의 위치에 대해 종속관계가 아주 크다.



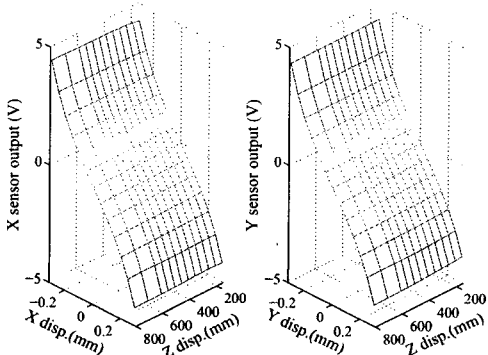
(a) Experiment



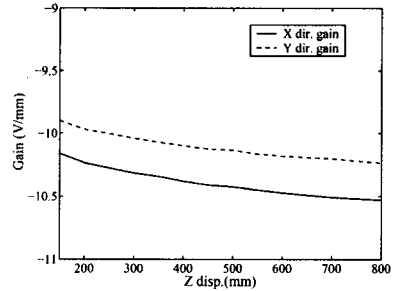
(b) Simulation

Fig. 11 Sensor outputs at Z = 0.65 mm

센서의 중심 위치에서, 축 방향 운동에 따른 X, Y 센서의 출력과 이득의 변동량을 Fig. 12에 나타내었다. X, Y 센서의 출력은 그리 많이 변화하지는 않으며, 중심 주변의 이득도 역시 5% 미만으로 감소하였다.



(a) X, Y output variation

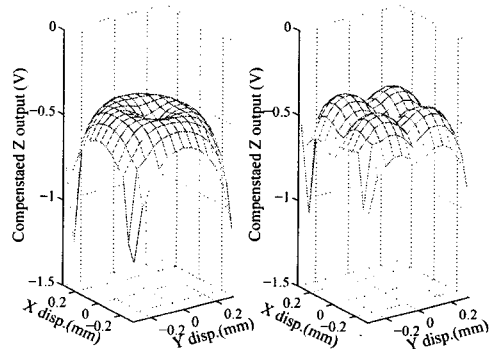


(b) Gain Variation

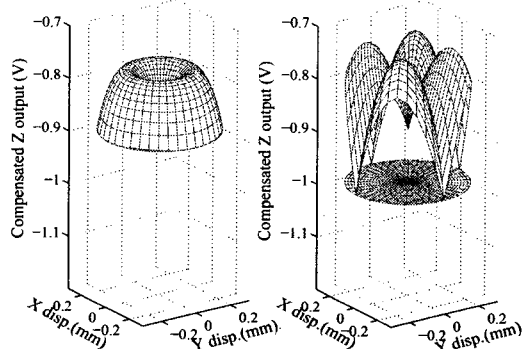
Fig. 12 Radial sensor variation due to axial motion

식 (17)과 식 (18)을 이용하여 보상을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 반경방향 위치의 중속성이 눈에 띄게 감소하였다.

축방향 틈새를 0.30에서 0.9 mm까지 변화시켜가며, Z 센서의 출력에 대한 실험결과와 시뮬레이션 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 시뮬레이션 결과가 실험결과와 상당히 일치하는 것을 볼 수 있다.



(a) Experiment



(b) Simulation

Fig. 13 Compensation results



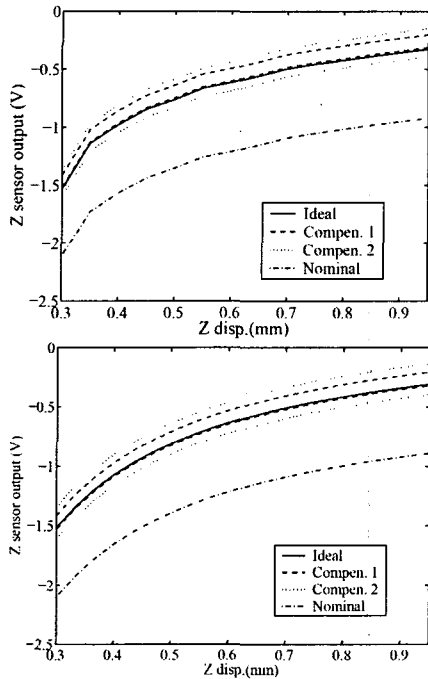


Fig. 14 Z sensor outputs

반경방향 운동에 따른 Z 센서의 출력 변동량을 Fig. 15 에 나타내었다. 실험결과와 시뮬레이션 결과가 매우 유사함을 볼 수 있다.

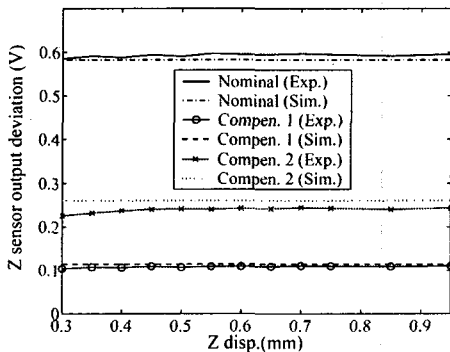
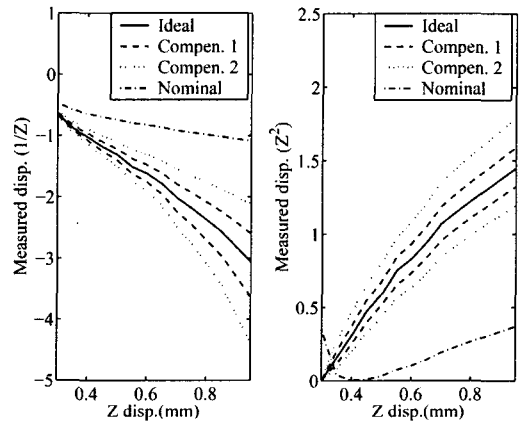


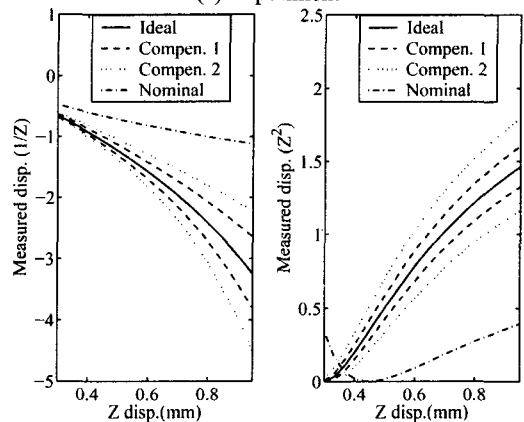
Fig. 15 Deviation of Z sensor outputs

Z 센서의 출력을 역 변환 및 제곱 변환을 수행한 후, 측정된 축 방향 운동과 그 변동량을 Fig. 16 에 나타내었다. 앞 장의 설계법에 언급한 바와 같이 제곱 변환의 오차가 역 변환의 오차보다 작

았다. 설계된 CCS 의 폭 비  $l/w$  는 0.417 이고, 이것은 역 변환과 제곱 변환에 필요한 값의 중간값이다. 반경 방향 측정 시 상대 오차는 약 15%였으며 역 변환의 경우 측정된 오차가 25%인 반면 제곱 변환의 경우 측정된 오차는 9.7%이었다. 또한, 역 변환의 경우 절대 영점 조정이 필요하므로, 영점 조정 역시 제곱 변환의 경우가 수월하다. 그러나 영점 조정이 잘 된 경우, 선형성은 역 변환의 경우가 더 좋은 결과를 보인다.



(a) Experiment



(b) Simulation

Fig. 16 Axial motion measurements

## 7. 결론

본 논문에서 반경 방향 및 축 방향 동시 측정이 가능한 새로운 원통형 정전용량 변위센서(CCS)를 제안하였다. 회전축의 축 방향 측정을 위하여

CCS 의 사용되지 않던 면을 사용하였다. CCS 에 본질적으로 존재하는 비선형성으로 인해 회전축의 반경방향 운동이 축 방향 운동 측정에 영향을 미침에도 불구하고 반경방향 운동과 축 방향 운동을 분리할 수 있는 간단한 보상기법을 제안하였다. 또한, CCS 의 오차 분석을 수행하였으며 반경방향과 축 방향 운동 측정에 동일한 정확도를 보장할 수 있는 설계법을 개발하였다. 최종적으로 제안된 CCS 에 대한 시험 장치와 회로를 구성하여 CCS 의 성능을 실험과 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 제안된 CCS 는 하드웨어 구성을 단순화 할 수 있고 시스템 설계 시 보다 많은 유연성을 제공할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 중기거점 기술개발사업 “IT 기반 나노제어 시스템 개발 사업”의 지원으로 수행되었음

## 참고문헌

1. Ahn, H. J., Jeon, S., Han, D. C., “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, 2000.
2. Jeon, S., Ahn, H. J., Chang, I. B. and Han, D. C., “A New Design of Cylindrical Capacitive Sensor for On-line Precision Control of AMB Spindle,” *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, Vol. 50, No,3 , pp.757-763, 2001.
3. Gradshteyn, I. S. and Ryzhik, I. M., “Table integrals, series, and product,” Academic press, Inc. 1982.