

## 마이크로미터 변위 측정을 위한 비접촉식 전기용량 센서 개발

### Development of a Non-contacting Capacitive Sensor for Measurement of $\mu\text{m}$ -order Displacements

\*김한준, 이래덕, 강전홍, 한상옥.

(Kim han jun, Lee rae duk, Kang jeon hong, Han sang ok)

#### Abstract

Non-contacting capacitive sensor, based on principle of the cross capacitor, for measuring of  $\mu\text{m}$ -order displacements have been fabricated and characterized. To overcome disadvantages of the existed capacitive sensors of parallel type with 2-electrodes and 3-electrodes, the developed new sensor was designed to have 4-electrodes, two of them used high and low electrode the other two used as guard electrodes, on a sapphire plate with diameter 17 mm and thickness 0.7 mm, and are symmetrically situated with a constant gap of 0.2 mm between the electrodes. This sensor can be used for measuring the distance between sensor and target not only the metallic but also non-metallic target without ground connection.

**Key Words** : non-contacting sensor, capacitive sensor, cross capacitor, 4-electrodes, sapphire plate, ground connection

#### 1. 서론

변위를 측정할 수 있는 센서는 접촉식과 비접촉식으로 구분할 수가 있다. 그러나 접촉식의 경우는 피측정체의 표면이 손상이 될 염려가 있거나 작은 접촉 압력에 의해서도 변형이 일어날 염려가 있는 경우에는 사용이 되어질 수가 없다. 미소의 변위를 비접촉식으로 정확하게 측정할 수 있는 센서의 종류는 와전류, 초음파, 광, 레이저, 적외선, 자기저항, 전기용량 등을 이용한 것이 있다<sup>[1-3]</sup>. 이 중에서 전기용량을 이용한 비접촉센서는 비교적 구조가 간단하고, 소형경량으로 제작이 가능하기 때문에 미소진동, 미

소의 간격, 미소의 두께, 회전변위, 표면분석, 압력변동 등의 측정에 널리 이용되고 있다<sup>[4-6]</sup>. 일반적으로 전기용량을 이용한 변위센서는 대부분 평행판 capacitor의 원리를 사용하여 왔다. 이때의 전기용량은

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

의 방정식으로 표현되고, 이를 이용하여 어떤 물리량을 측정하기 위해서는 유전체의 유전상수( $\epsilon_r$ ), 전극의 대향면적( $A$ ), 그리고 대향전극간의 간격( $d$ )을 변화시키는 방법들이 이용될 수 있다. 간격변화에 의한 전기용량 변화의 경우 변위의 감도는 미소변위  $\delta d$ 에 대응되는 전기용량  $\delta C$ 의 비로 식(2)처럼 표현된다.

$$\frac{\delta C}{\delta d} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d^2} \quad (2)$$

즉 간격  $d$ 가 가까울수록 감도가 좋고 전기용량이 증

\* 한국표준과학연구원 전기그룹  
(대전시 유성구 유성유체국 사서함 102호  
Fax: 042-868-5018  
E-mail : hanjun@kriss.re.kr)  
\*\* 충남대학교 전기공학과

가되는 특성을 지니게 된다. 따라서 이러한 비선형적인 특성을 보완하기 위하여 전기용량-전압 혹은 전기용량-전류의 변환회로로 구성되는 신호변환기를 사용하여 실제 측정하고자 하는 변위와 동일한 값으로 표시되도록 하고 있다. 또한 평행판 구조의 센서에서는 target되는 대향전극이 반드시 하나의 전극으로 접지 되어져야만 된다. 본 연구에서는 기존의 평행판 구조의 비접촉식 전기용량 센서가 지니는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 Thompson-Lampard 정리를 적용한 cross capacitor 구조<sup>[7]</sup>의 새로운 센서를 설계제작하고 그 특성을 분석하고 실제 측정에 적용하였다.

## 2. 이론 및 센서의 제작

### 2.1 cross capacitor 전극형 센서제작 및 특성

위에서 언급한 문제점을 해결하기 위하여 그림 1과 같이 4-전극형 전기용량 센서의 감지부를 설계 제작 하였다.

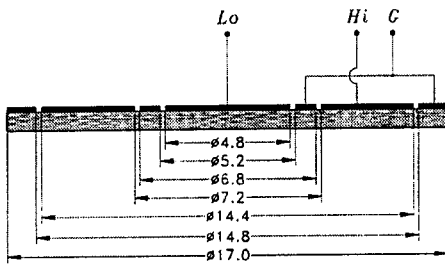


그림1. 4-전극형 전기용량 센서의 감지부.

이 구조는 종래의 평행판 capacitor 원리와는 전혀 다른 Thompson-Lampard 정리<sup>[7]</sup>에 의한 cross capacitance 측정원리를 적용시킨 것이다. 이 정리에 의하면 닫혀진 임의의 단면이 4개의 좁은 절연 gap으로 나뉘어진 전극구조에서 대향하고 있는 전기용량  $C_1$ 과  $C_2$ 사이에는

$$\exp\left(-\frac{\pi}{\epsilon_0} C_1\right) + \exp\left(-\frac{\pi}{\epsilon_0} C_2\right) = 1 \quad (3)$$

의 관계가 성립한다. 이 원리를 상기와 같이 한 개의 면에 4개의 전극을 만들었을 때의 전기용량은 전극면의 산화, 흡습, 기름층과 같은 유전체 layer에 대하여 보상관계가 있어서 대단히 안정되고, 정확한 측정이 가능하게 된다. 그림1과 같이 중심으로부터 측정전극( $L_0$ ), guard( $G$ ), 대향전극( $H_1$ ), guard( $G$ )의 순서로 구성되어,  $L_0$  전극과  $H_1$  전극 사이에 유도되는 전기용량을 측정하게 됨으로서 측정 대상체의 재

질 및 전극으로서의 사용여부에 관계없이 간격 및 미소변위를  $\Delta C = \Delta d$ 의 관계로 측정할 수 있도록 되었다. 각각의 전극과 gap을 금속과 절연체의 기계적으로 가공을 할 때의 gap의 일정한 간격유지가 어렵고, 전극의 표면상태도 나빠질 뿐 만 아니라 크기도 일정이상 작게 제작하기가 어렵다. 본 연구에서는 이러한 결점들을 극복하고자 직경 17 mm, 두께 0.7 mm의 사파이어 평행판 한쪽 위에 RF sputtering 시스템을 이용하여 copper로써 두께 0.3  $\mu\text{m}$ 의 전극을 그림1처럼 형성하였다. 따라서 각 전극 간격을 0.2 mm로 균일하게 유지할 수 있었고 완전한 대칭유지가 가능하였다. 또 형성된 전극이 조립시 사파이어의 뒷면에 놓여지게 되므로 센서 사용시 손상도 방지할 수가 있었다.

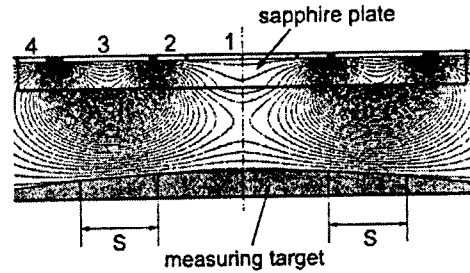


그림2. 개발된 센서 전극면의 등전위 분포.

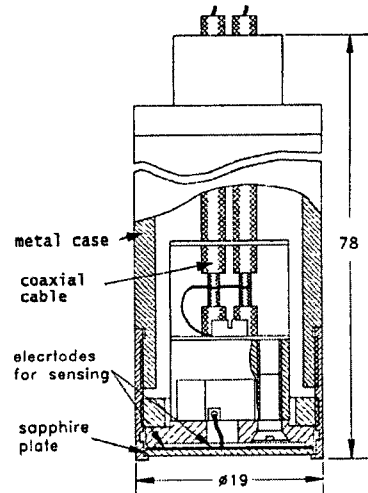


그림3. 조립된 센서의 모양 및 내부구조.

그림2는 직경 70 mm의 원통 스테인레스 스틸의 측정물의 진원도 및 직진도를 이 센서를 사용하여

측정할 경우를 가상하여 2D Field FEM program을 사용하여 simulation을 해 본 것이다. 그림에서 거의 모든 전기력 선이 폭이 “S”정도인 고리모양의 면적에 밀집되고 있음을 알 수 있다. 이것은 측정결과를 나타내는 data들이 센서의 실제단면 전체에서 주어지는 것이 아니라 극히 얇은 폭을 지닌 고리부분에서만 얻어짐을 의미한다. 이것은 기존의 센서에 비해 피 측정체의 표면을 미세하게 분석할 수 있음을 의미한다. 그림3은 조립 완성된 전기용량 센서의 모양을 보인 것이다. 감지부인 사파이어 원판이 metal case의 측과 수직을 유지하고, case내부에서 stray capacitance 발생을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 조립의 편의성을 고려한 구조로 제작하였다.

## 2.2 제작된 센서의 교정

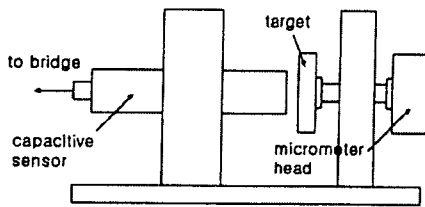
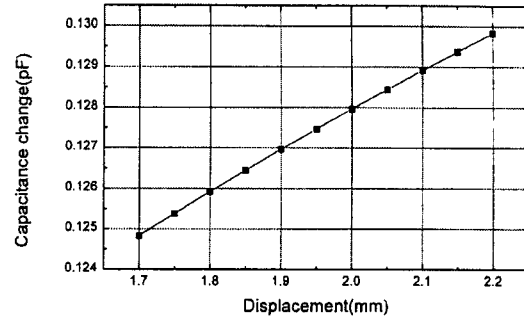


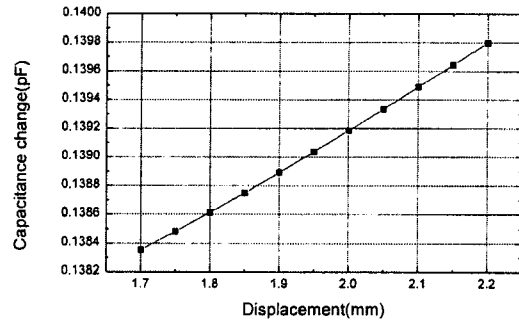
그림4. 센서의 교정을 위한 장치.

제작된 센서의 선형성과 실제간격과의 관계성을 교정하기 위하여 그림4와 같이 분해능이 0.5  $\mu\text{m}$ 인 micrometer head를 이용하여 교정장치를 제작하였다. 즉 센서의 위치를 고정시키고 측정대상물을 micrometer head의 spindle 끝 부분에 고정시킨 후 head를 돌려서 target를 50  $\mu\text{m}$ 씩 일정하게 이동시키면서 전기용량을 측정하였다. 측정결과 센서전극 표면에서 피 측정물까지의 간격을 1.95 mm 정도로 유지한 상태에서 전후의 변위를 측정하는 것이 선형도와 측정분해능과의 상관관계상 최적으로 판단되었다. 이 영역에서의 전기용량 변화는 10 aF/ $\mu\text{m}$ 로 분석이 되었으며, 측정범위 (1.95  $\pm$  0.5) mm의 상관계수(correlation coefficient)는 0.998 7, 측정범위 (1.95  $\pm$  0.25) mm에서의 상관계수는 0.999 5이었다. 한편 실제 측정된 전기용량 값을 변위 값으로 환산해 본 결과 측정범위 (1.95  $\pm$  0.5) mm full range에서의 불확도는 0.65 %, 측정범위 (1.95  $\pm$  0.25) mm full range에서의 불확도는 0.05 %이하로 분석되었다. 이 결과로 판단할 때 수십  $\mu\text{m}$ 의 미소변위를 측정시의 불확도는 거의 0에 가까운 것으로 판단할 수 있다. 그림5의 (a)는 피 측정 대상물을 금속으로, (b)

는 PTFE를 비금속 대상으로 하여 (1.95  $\pm$  0.5) mm에서 측정된 것을 나타내었다.



(a)



(b)

그림5. 개발된 센서의 미소변위에 따른 전기용량값의 변화. (a) 금속대상물(stainless steel),

(b) 비금속 대상물(PTFE)

## 2.3 실장 측정 실험

개발된 센서를 사용하여 전기용량 원기인 vertical cross capacitor의 전극봉으로 사용되는 직경 70 mm, 길이 700 mm stainless steel 봉을, 진원도 1  $\mu\text{m}$ , 직진도 1  $\mu\text{m}$  이내를 목표로 정밀기계가공하는 과정에서 측정에 사용하였다. 2개의 센서를 선반에서 가공상태인 봉의 상하에 1.95 mm 간격을 띄우고 설치하였으며, ratio transformer형 전기용량 측정 브리지를 사용하여 봉의 상하 센서의 전기용량 값 차이를 브리지의 출력전압의 크기로 출력하고 이를 레코더에서 기록하는 방법으로 측정을 하였다. 이러한 측정과정과 필요부분의 반복기계가공으로 목표표 하는 전극봉을 가공할 수가 있었다. 그림6과 7은 각각 기계가공중인 전극봉의 직진도와 진원도를 그린 그래프이다. 그래프로부터 직진도는 약 1.8  $\mu\text{m}$  (peak-peak) 진원도는 약 2  $\mu\text{m}$  정도임을 알 수가 있다.

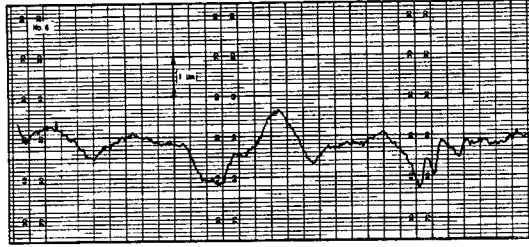


그림6. 측정된 직경 70 mm, 700 mm stainless steel  
봉의 직진도 그래프.

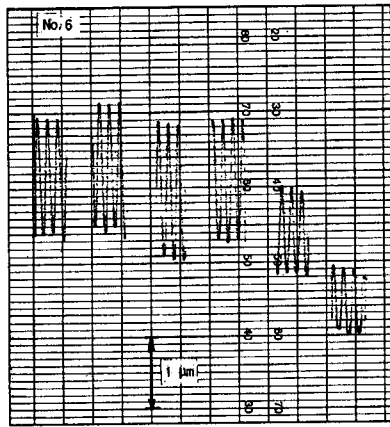


그림7. 측정된 직경 70 mm, 700 mm stainless steel  
봉의 직원도 그래프.

### 3. 결 론

사파이어 평행판 위에 cross capacitor 원리를 이용하여 제작된 4-전극형 비접촉 전기용량센서는 사파이어 평행판 위에 RF sputtering 시스템을 사용하여 Lo와 Hi전극을 같은 면에 copper로 형성함으로써, 측정 대상체의 재질 및 전극으로서의 사용여부, 접지여부에 관계없이 간격 및 미소변위를  $\Delta C = \Delta d$ 의 관계로 측정할 수 있도록 되었다. 측정 범위 ( $1.95 \pm 0.25$ ) mm에서의 상관계수가 0.999 5로 분석이 되었다. 이 결과로 판단할 때 수십  $\mu\text{m}$ 의 미소변위를 측정시의 상관관계는 1에 가까워 거의 완벽한 직선특성을 지니게 된다. 새로운 원리로 개발된 본 센서는 전기용량 원기인 vertical cross capacitor의 전극봉으로 사용되는 직경 70 mm, 길이 700 mm stainless steel 봉을, 직원도 1  $\mu\text{m}$ , 직진도 1  $\mu\text{m}$  이내를 목표로 정밀기계가공 하는 과정에서 측정에 사용이 되어 그 우수성을 확인하였으며 cross capacitor의 전극봉과 case사이에 장착이 되어 전극

의 변형여부를 감지하는 센서로 계속 사용되고 있다. 한편 본 센서로 단순한 변위 측정은 물론, 미소 진동의 측정, 두께의 미소변화 측정, 회전수 측정, 편심도 측정 등에 적절히 응용할 수가 있다.

### 감사의 말씀

본 연구를 위하여 빈번한 조언을 주신 러시아 VNIIM의 Yu. Semenov 박사님과 전극 형성에 도움을 주신 한국표준과학연구원 박세일 박사님께 감사의 말씀을 전합니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] P. H. Mansfield, "Electrical Transducers for Industrial Measurement", London, Butterworths, 1973.
- [2] Hermann K. P. Neubert, "Instrument Transducers", Oxford, Claren Press, pp. 68-290, 1975.
- [3] P. H. Sydenham, "Microdisplacement Transducers", J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 5, pp. 721-733, 1972.
- [4] F. N. Toch, D. Bertels, G. C. M. Meijer, "A low-cost, highly stable reference capacitor for capacitive sensor system", IEEE I&M Conf. IMTC Proceedings, pp. 412-415. 1995.
- [5] R. Nerino, "Capacitive sensor arrays in dimensional analysis of surfaces," IEEE I&M Vol. 44(4), pp. 875-880, 1995.
- [6] Zang Yan-Fen, Liu-Xiang-Yang, Zhang Guo-Xiong, "Method for the Straightness measurement of vertical guideways of machine tools using capacitive and inductive sensors," Proceedings of the SPIE, Vol. 2101(2), pp. 843-847, 1993.
- [7] D. G. Lampard, "A New Theorem in Electrostatics with Applications to Calculable Standards of Capacitance", Inst. of Elect. Engr. Monograph no. 216M, pp. 271-280 .1957.