

초정밀 측정용 정전용량 변위센서에 관한 연구

안형준*, 장인배**, 한동철***

A Study on a Capacitive Displacement Sensor for the Ultraprecision Measurement

Hyeongjoon Ahn*, Inbae Chang**, Dongchul Han***

ABSTRACT

This paper discusses numerically and experimenally several design parameters for the plate-type capacitive displacement sensor. The influences of shape of this sensor on the sensitivity are numerically analyzed with the charge density method. Using many test sensor plates of different shape for verifying the validity of this method can not guarantee the repetibility of experiments.. Therefore we made specially the test sensor plate so that experiments of effects of shape of this sensor on sensitivity can be done with only that plate. Results from these experiments agree well with those from numerical analysis.

Key Words: capacitive displacement sensor(정전용량 변위센서), charge density method(전하밀도법), sensitivity(민감도), sensor design parameters(센서설계인자)

1. 서 론

대상물과의 간격이 작은 초정밀 측정에는 변위 민감도가 높은 정전용량센서가 많이 사용된다. 그런데, 상용프루브형 정전용량센서는 형상이 고정되어 있기 때문에 제한된 공간에서 최대의 민감도가 필요한 초정밀 측정에는 부적합한 경우가 많고, 프루브형 보다는 판형으로 만드는 것이 가공오차나 표면조도 등의 영향을 줄일 수 있는 등의 장점이 있기 때문에 정전용량센서를 직접 제작하여 Salazar⁽¹⁾, 장인배⁽²⁾는 자기베어링에 적용하였고, Chapman⁽³⁾, 박상신⁽⁴⁾은 공기베어링의 회전정밀도 측정에 적용하였다.

제한된 공간에서 최고의 민감도를 가지는 정전용량센서를 설계하기 위하여 Heerens⁽⁵⁾은 해석적인 방법을, Bonse⁽⁶⁾, Hirasawa⁽⁷⁾는 유한요소법을 이용하였다. 하지만 해석적인 방법은 변수들의 물리적인 의미는 쉽게 파악할 수 있지만 가정이 많아지면 잘 맞지 않고, 유한요소법은 비교적 정확하여 많이 사용되고 있으나 센서의 크기에 비하여 센서와 대상물 사이의 간격이 매우 작고 수십 μm 에서 수백 μm 로 차수가 변하는 변위센서의 경우에는 모델링이 매우 어렵다.

본 논문에서는 정전용량센서를 설계하기 위한 해석방법으로 앞의 두 방법 대신 정전렌즈와 같이 축대칭 물체의 전기장 해석에 쓰이던 전하밀도법을 도입하였다. 우선 정

* 서울대학교 대학원 기계설계학과
 ** 강원대학교 정밀기계공학과
 *** 서울대학교 기계설계학과

정전용량센서를 정전용량 형성방식에 따라서 두가지로 나누고 전하밀도법을 이용하여 각각의 원형평면 정전용량센서를 여러 가지 설계인자들을 변화시켜가며 변위민감도 해석을 수행하였다. 그리고 전하전달법에 의한 정전용량 검출회로를 직접 구성하여 원형평면 정전용량센서 변위민감도 실험을 통하여 전하밀도법에 의한 해석결과와 비교하였다.

2. 전하밀도법에 의한 정전용량센서 해석

2.1 전하밀도법⁽⁸⁾

일반적으로 정전용량센서는 여러 도체로 구성되기 때문에 이를 해석하기 위해서 여러 도체 사이의 정전용량을 정확히 정의하는 것이 필요하다. 일반적으로 n 개의 도체로 이루어진 도체 계에서 도체들의 전위 $V_i(i=1 \text{ to } n)$ 에 의하여 k 번째 도체에 유기되는 전하량 Q_k 는 식 (1)과 같이 표현된다.⁽⁹⁾

$$Q_k = c_{k1}V_1 + \dots + c_{kk}V_k + \dots + c_{kr}V_r + \dots + c_{kn}V_n \quad (1)$$

위의 식 (1)을 행렬식으로 표시하면 식 (2)와 같다.

$$\{Q\} = [C] \cdot \{V\} = [S]^{-1} \cdot \{V\} \quad (2)$$

여기서 $\{Q\}$ 는 전하량 열벡터, $\{V\}$ 는 전위 열벡터이고, $[C]$ 는 정전용량행렬이고 $[S]$ 는 일래스탄스(Elastance) 행렬이다.

Fig. 1 과 같은 도체에서 면적이 A_i 인 $i(i=1 \text{ to } N)$ 번째 요소가 일정한 표면 전하밀도 σ_i 를 가지면 이 요소에 저장된 전하 q_i 는 $\sigma_i A_i$ 가 된다. 나머지 N 개의 요소들에 의한 j 번째 요소 $R_j = (p_j, z_j)$ 에서의 전위 $V(R_j)$ 는 식 (3)과 같이 표현된다. (ϵ_0 permittivity const)

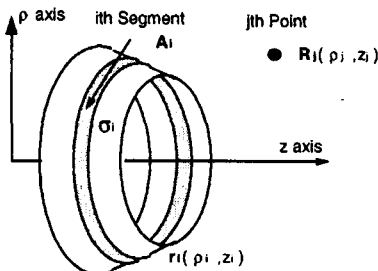


Fig. 1 Axis symmetric model

$$V(R_j) = V_j = \sum_{i=1}^N S_{ji} q_i \quad (3)$$

$$S_{ji} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 A_i} \int_{A_i} \frac{dr_i}{|R_j - r_i|}$$

행렬 $[S]$ 는 전위 V 나 전하량 Q 의 함수가 아닌 도체의 형상을 나타내는 변수 R 과 r 만의 함수임을 알 수 있다. 식 (3)에 의하여 구한 행렬 $[S]$ 와 각각의 도체들의 전위 $\{V\}$ 를 가지고 식 (2)를 통하여 각 도체 요소들의 전하량 q_i 를 구할 수 있다. 구한 전하량 q_i 를 이용하여 다음 식 (4)를 통하여 임의의 점에서 전위 $V(r)$ 를 연속적으로 구할 수 있다.

$$V(r) = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 A_i} \int_{A_i} \frac{dr_i}{|r - r_i|} \quad (4)$$

앞에서 설명한 전하밀도법은 축대칭 구조물의 전기장 해석에 쓰이던 것이다. 이 방법은 전기장을 연속적으로 구할 수 있으며 모든 공간을 요소로 나누어 계산하는 유한요소법에 비하여 도체만을 요소로 하고, 변위센서처럼 반경 방향의 경계조건이 열려있는 경우에도 반복 계산을 통하여 수렴시킬 필요가 없기 때문에 계산이 효율적이다.

2.2 원형평면 정전용량센서 해석

Fig. 2 a)와 같이 일반적인 평면 정전용량 변위센서는 센서부, 가드 그리고 접지 등 세 부분으로 구성된다.⁽⁵⁾ 그리고 Fig. 3과 같이 정전용량센서는 정전용량의 형성방식에 따라 대상물과 센서 사이에 형성되는 정전용량을 검출하는 접지단자(Earthed terminal)센서와 대상물로

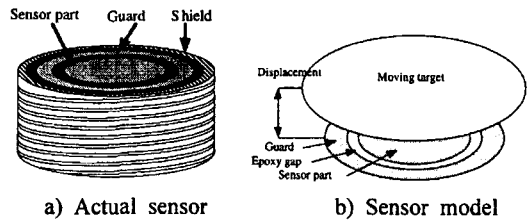


Fig. 2 Flat circular capacitive sensor

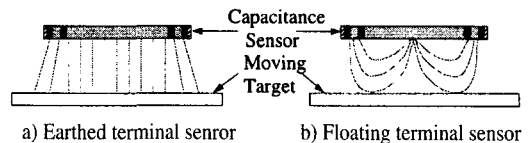


Fig. 3 Sensor types due to forming capacitance

인하여 두 도체 사이 정전용량의 변화를 검출하는 부동단자(Floating terminal) 센서로 나눌 수 있다.¹⁰ 부동단자센서는 접지단자센서에 비하여 민감도는 작지만 측정에 나쁜 영향을 주는 기생정전용량(Stray capacitance)¹⁵을 배제할 수 있고, 대상물의 절대전위에도 민감하지 않기 때문에 긴 시간동안의 작동 신뢰성이 높다.

전하밀도법으로 Fig. 2 a)와 같은 원형 평면 정전용량 변위센서를 해석하기 위하여 신호를 보호하는 역할을 수행하는 접지부분을 무시하고 Fig. 2의 b)와 같이 센서를 모델링하였다. 센서의 민감도에 영향을 미치는 설계 변수로는 크게 센서부와 가드 사이 틈새(gap), 센서부와 가드 사이의 면적비를 들 수 있다. 틈새의 영향을 알아보기 위하여 센서부와 가드 면적을 고정시키고 센서부와 가드 사이 틈새의 너비를 넓혔을 때, 그리고 센서부와 가드의 면적비 영향을 알아보기 위하여 전체 센서 외경과 틈새를 고정시키고 센서부와 가드 사이의 면적비를 1:7에서 7:1 까지 변화시킬 때 민감도 변화를 고찰하였다.

센서부의 면적과 가드의 면적은 고정시키고 둘 사이의 틈새를 넓혀가면서 틈새의 영향을 살펴보았다. 접지단자센서에서는 Fig. 4 a)와 같이 틈새가 증가함에 따라 민감도가 커지나 틈새가 어느 정도 이상이 되면 민감도 차이가 없어지고, 부동단자센서에서는 Fig. 4 b)와 같이 틈새가 증가함에 따라 센서의 민감도는 감소하나 변위에 대한 정전용량의 선형성은 좋아진다. 둘을 같은 조건에서 비교할 때 접지단자센서의 변위민감도가 2배 가량 크나 선형성은 부동단자센서가 우수하다.

센서의 전체 외경과 틈새를 고정시키고 가드에 대한 센

서부의 면적비를 1:7에서 7:1로 변화시키면서 전하밀도법으로 면적비의 영향을 살펴보았다. 접지단자센서에서는 Fig. 5 a)와 같이 틈새가 고정되면 틈새의 너비에 상관없이 가드에 대한 센서부의 면적비가 커질수록 민감도가 커지고, 부동단자센서에서는 Fig. 5 b)와 같이 틈새가 넓어지면 민감도가 최대가 되는 면적비가 7:1에서 4:4로 이동해 간다. 틈새가 작을 때에는 두 센서 모두 면적비가 틈새보다 중요한 인자이며 둘을 같은 조건에서 비교할 때 접지단자센서의 변위민감도가 2-3배 가량 크다.

3. 원형평면 정전용량센서 변위민감도 실험

전하밀도법의 센서 해석을 정량적으로 검증하기 위해서는 면적비나 틈새 등이 다른 여러 형상의 센서판을 제작하여 각각 실험해야 한다. 하지만, 이런 경우에 매번 실험의 준비 과정에서 대상물과 센서의 기준 위치가 달라지기 때문에-특히, 대상물과 거리가 아주 작은 곳에서는 민감도가 아주 커서-큰 오차가 발생할 수 있다. 이렇게 정량적인 검증이 어렵기 때문에 경향을 알 수 있으면서 위와 같은 실험 준비의 문제점을 극복할 수 있는 실험장치를 고안하였다. 면적이 같고 틈새가 일정한 도체들로 구성된 원형 센서판과 전하전달법에 의한 정전용량 검출회로를 제작하여 한 지점에서 여러 실험을 동시에 수행하였다.

3.1 정전용량 검출회로^{(11),(12)}

본 논문에서 사용한 정전용량 측정회로는 Fig. 6에 도시되어 있듯이 CMOS 스위치(S_1, S_2)를 이용하여 미지의

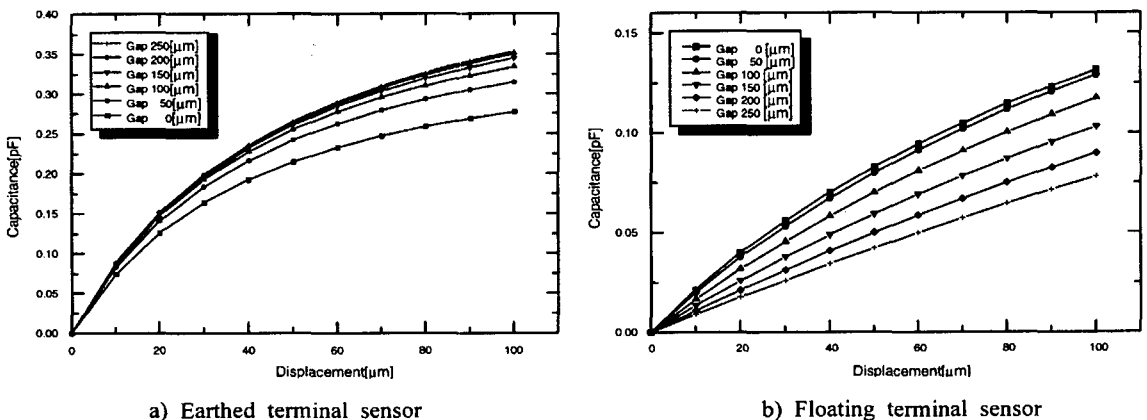
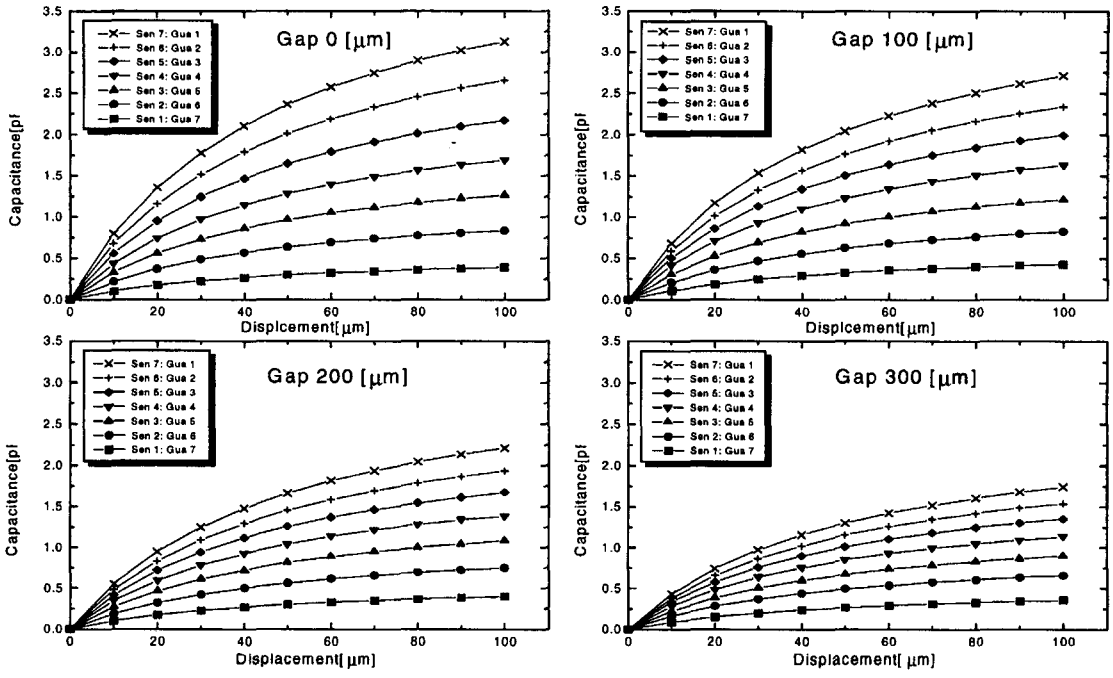
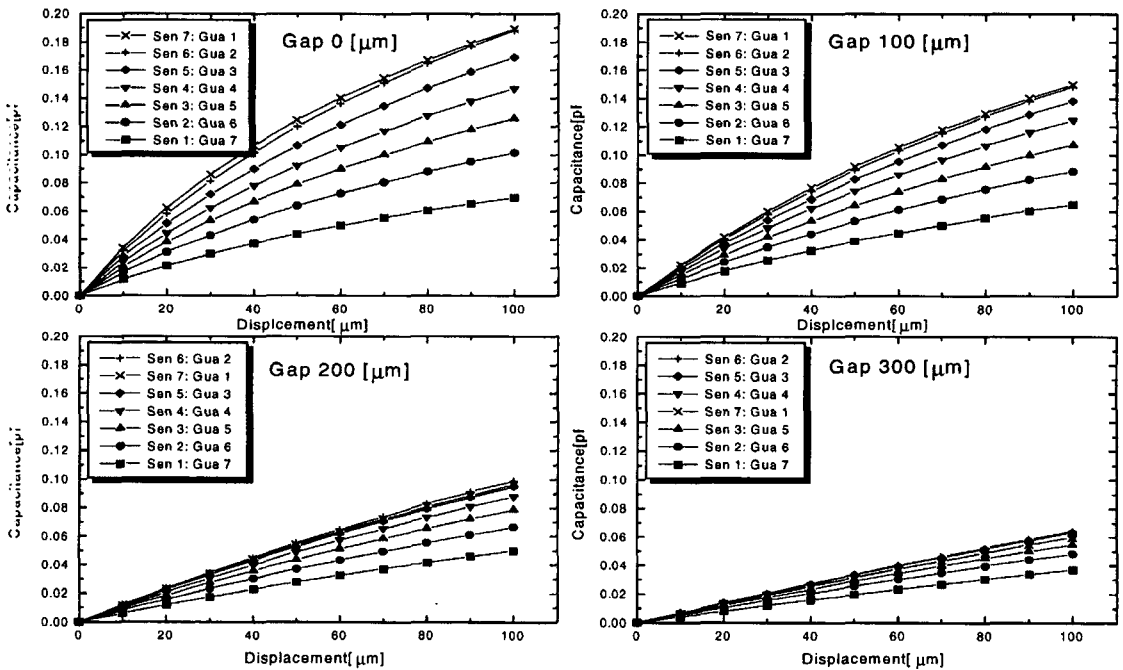


Fig. 4 Effects of gap on flat circular capacitive sensor



a) Earthed terminal sensor



b) Floating terminal sensor

Fig. 5 Effects of gap and area ratio on flat circular capacitive sensor

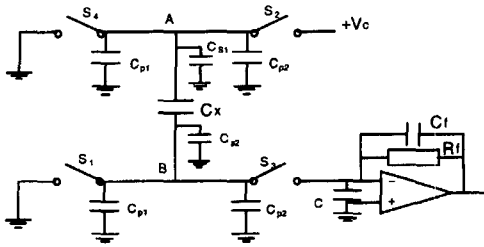


Fig. 6 Basic circuit of Sensor amp

정전용량 C_x 을 일정한 전압원 V_c 로 충전시킨 후 이를 방전시키면서 충전되어 있던 전하로 인하여 흐르는 순간전류를 OP Amp로 적분하여 정전용량에 비례하는 직류전압을 얻는 전하전달원리(Charge transfer principle)회로이다.

이 방법의 회로는 작동 원리상 아주 높은 대역폭을 가지며, 전류를 적분하여 출력을 얻기 때문에 잡음이 적고, 따로 정전용량에 비례하는 출력을 얻기 위한 부대 장치-예를 들어 최고치 검출장치, 위상 검출 장치 등-가 필요하지 않아 회로가 간단하다. 또한 특별한 스위칭 방법을 통하여 기생정전용량(C_{s1} , C_{s2} , C_{p1} , C_{p2})을 배제할 수 있으며, 기본 전압 변동량(Drift)도 줄일 수 있다. 전하전달방법 회로는 Fig. 6과 같이 OP Amp와 귀환저항 R_f 과 귀환 콘덴서 C_f 로 구성되는 전류적분회로이므로 아주 큰 적분상수 $T_f = R_f C_f$ 를 택하여 스위칭 주파수 f 의 영향을 최소화하면 방전 전류 펄스를 적분하여 미지의 정전용량인 C_x 에 비례하는 직류전압 출력 V_o 를 얻을 수 있다. 회로해석을 통하여 얻은 정상상태의 출력과 민감도는 아래식 (5)과 같다.

$$V_o = -C_x V_c f R_f, \quad \frac{dV_o}{dC_x} = -f R_f V_c \quad (5)$$

위의 (5)식에서와 같이 민감도가 충전 전압 V_c , 구동 주파수 f , 귀환저항 R_f 의 곱으로 표시된다.

3.2 변위민감도 실험

Fig. 7과 같은 면적이 같고 사이의 틈새가 일정한 1-6의 도체들로 이루어진 센서판을 제작한 후 각각의 도체에 스위치를 연결하고 위의 Fig. 8과 같은 실험장치로 대상물을 0-100 μ m로 10 μ m씩 이동시키면서 연결한 스위치를 조작하여 한 위치에서 여러 가지 센서 형상변수에 대한 변위민감도 실험을 수행하였다. 측정 대상물을 움직이는

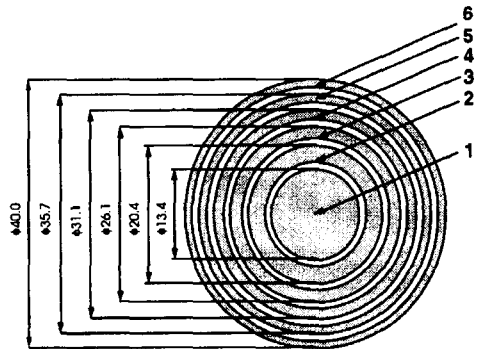


Fig. 7 Flat circular sensor test plate

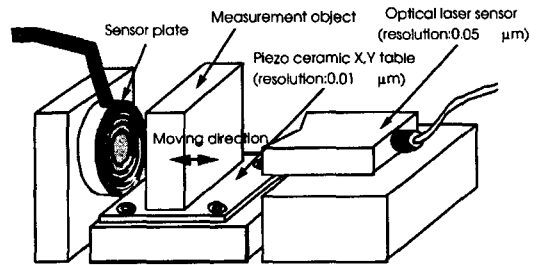


Fig. 8 Sensitivity experimental equipments

이송장치는 0.01 μ m 분해능의 압전(piezo) X,Y 테이블이고 변위를 측정하는 장치는 0.05 μ m 분해능의 광학 레이저 센서를 사용하였다. 그리고 4MHz로 구동되며 10kHz의 주파수대역을 가지는 센서 증폭기를 제작하여 사용하였다.

첫 번째 스위치를 이용하여 면적비를 1:5, 2:4, 3:3, 4:2, 5:1로 증가시킬 때, 두 번째 면적비를 1:4, 2:3, 3:2, 4:1로 증가시키면서 동시에 센서부와 가드의 틈새를 넓힐 때, 세 번째 가드 바깥쪽에 접지를 넓힐 때 대상물과의 거리를 증가시키며 각각 센서 증폭기에서 나오는 전압을 측정하였다.

3.3 실험결과

접지단자센서는 Fig. 9 a)와 같이 가드에 대한 센서부의 면적비가 증가할수록 민감도가 선형적으로 커져 면적비가 5:1일 때 최대의 민감도를 가지고, 부동단자센서는 Fig. 9 b)와 같이 가드에 대한 센서부의 면적비 4:2에서 최대의 민감도를 가진다. 즉, 부동단자센서는 해석을 통하여 최대의 민감도를 가지는 면적비를 찾아내어 설계해야 한다.

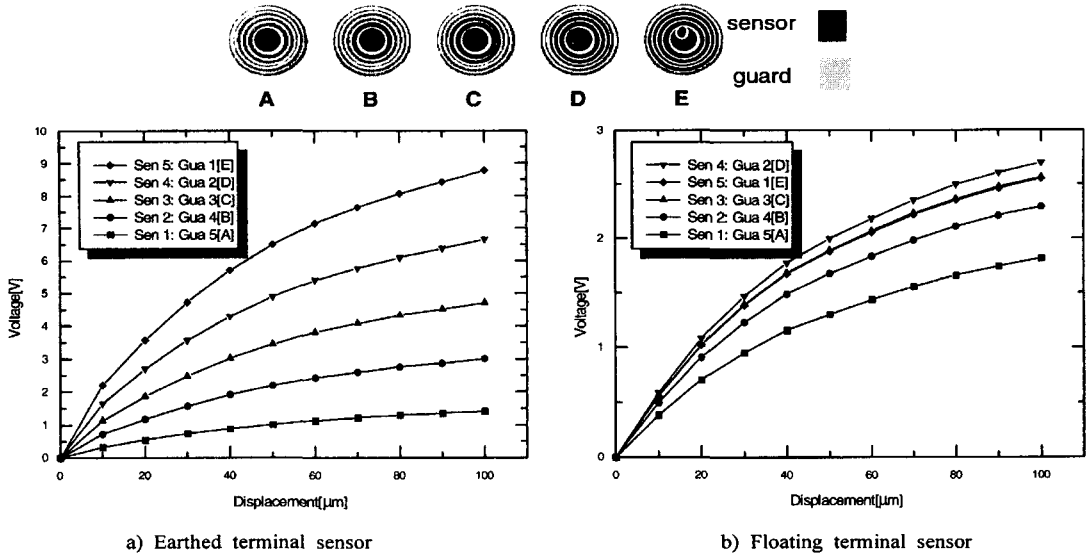


Fig. 9 Sensitivity experiment result of area ratio effect

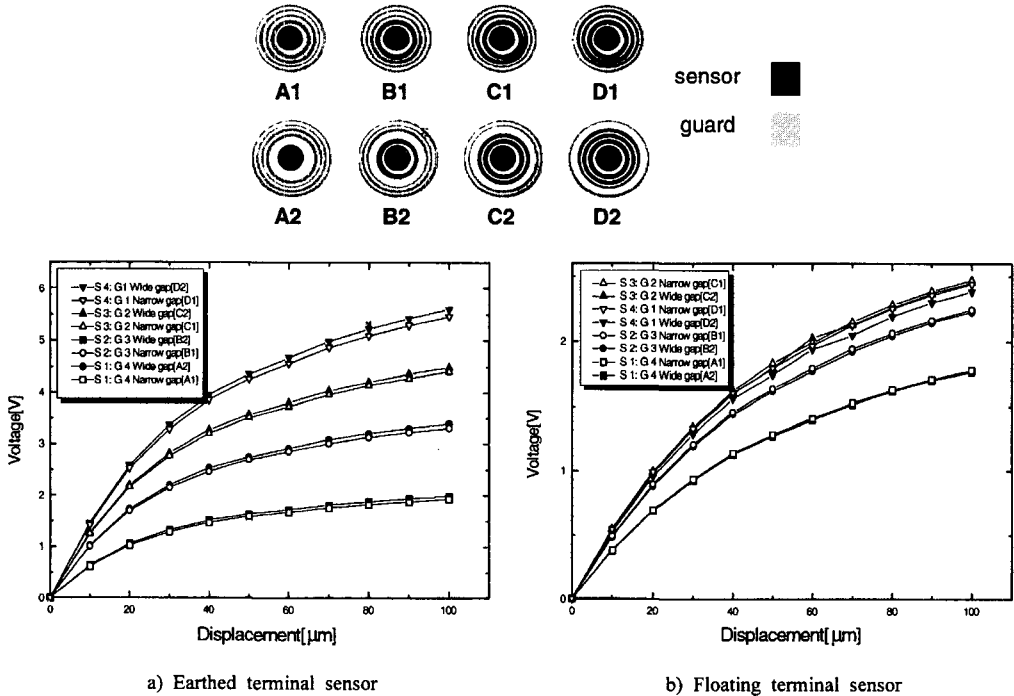


Fig. 10 Sensitivity experiment result of gap and area ratio effect

접지단자센서는 Fig. 10 a)와 같이 틈새가 일정할 때는 면적비가 증가할수록, 면적비가 같을 때는 틈새가 넓어질수록 민감도가 커지고, 부동단자센서는 Fig. 10 b)와 같이 센서부와 가드의 면적비가 3:2에서 최대의 민감

도를 가지며 면적비가 같을 때는 틈새가 좁을수록 민감도가 커진다. 틈새가 일정 이상이 되면 정전용량센서의 설계에 있어서 틈새보다는 면적비가 더 중요한 설계 인자임을 알 수 있다.

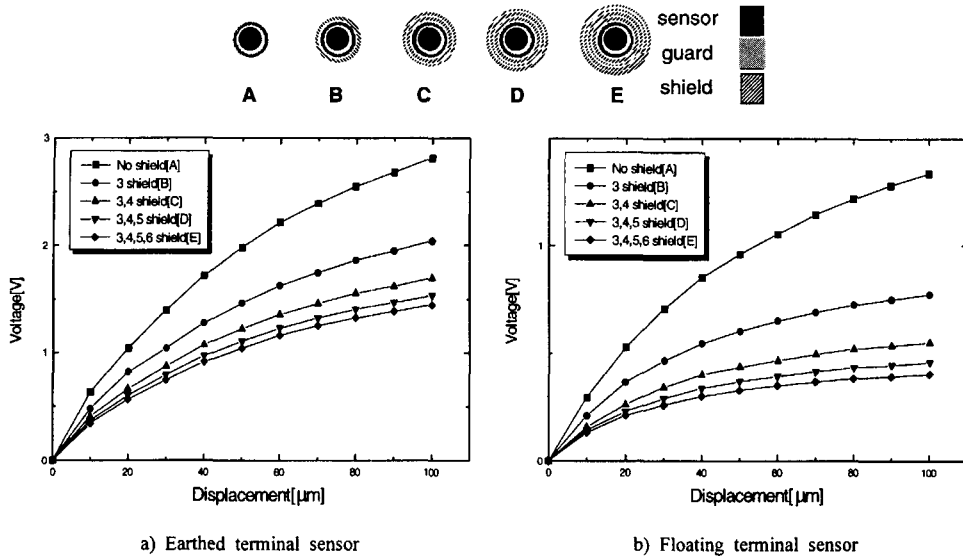


Fig. 11 Sensitivity experiment result of shielding effect

접지 실험의 결과를 도시한 Fig. 11에서는 접지의 면적이 증가할수록 민감도가 줄어들고 접지의 면적이 일정 이상 넓어지면 민감도의 차이가 없어짐을 알 수 있다. 그러나, 접지를 하지 않으면 외부의 잡음에 민감하게 되므로 접지를 하되 되도록 적은 면적으로 해야 한다.

전하전달법을 이용하여 제작한 정전용량 측정회로로 원형평면 정전용량센서의 세가지 설계인자에 대한 변위민감도 실험을 수행하였으며 이를 통하여 전하밀도법이 정전용량센서를 해석하는데 매우 효과적임을 알 수 있었다.

4. 결 론

전하밀도법을 이용하여 정전용량 센서의 여러 설계변수가 민감도에 미치는 영향을 해석하였고, 전하전달법을 이용한 회로로 원형평면 정전용량센서 변위민감도 실험을 수행하였다.

전하밀도법의 해석과 원형평면 정전용량센서 변위민감도 실험을 비교하여 전하밀도법이 비교적 효율적이고 정확한 해석방법임을 보였으며 정전용량센서에서 전하밀도법과 같은 해석을 통하여 각각의 적용대상에 따라 최대의 변위민감도를 갖도록 여러가지의 설계인자들을 최적화하는 것이 필요함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. A.O.Salazar, W.Dunford, R.Stephan, E.Watanabe. "A Magnetic Bearing System using Capacitive Sensors for Position Measurement", *IEEE Trans. on Mag.* Vol. 26, No. 5, Sep. 1990.
2. 장인배, "캐패시턴스 센서가 내장된 자기 베어링의 작동 성능향상에 관한 연구", 서울대학교 박사학위논문, 1994.
3. P.D.Chapman, "A Capacitive based Ultra-precision Spindle Error Analyser", *J. of Precision Engineering.* Vol. 7, No 3, July, 1985.
4. 박상신, "초정밀 공작기계용 공기베어링의 해석 및 진동특성 측정에 관한 연구", 서울대학교 박사학위논문, 1995.
5. W.C.Heerens, "Application of Capacitance Techniques in Sensor Design", *J. Phys. E:Sci.Instrum.*, Vol. 19, pp 897~906, 1986.
6. M.H.W Bonse, C. Mul, J.W Spronck, "Finite-element modelling as a tool for designing capacitive position sensors", *Sensors and Actuators A*, Vol.46-47, pp. 266-269, 1995.

7. M.Hirasawa, M.Nakamura, M.Kanno, "Optimum Form of Capacitive Transducer for Displacement Measurement", *IEEE Trans. Instru. Meas.*, Vol.33, No.4, pp 276-280, 1984.
8. A.Renau, F.H.Read, J.N.H.Brunst, "The charge-density method of solving electrostatic problems with and without the inclusion of space-charge", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol.15, pp. 347~354, 1982.
9. W.R.Smythe, *Static and Dynamic Electricity*, Mcgraw-hill.
10. D Marioli, E Sardini and A taroni, "High-accuracy measurement techniques for capacitance transducers", *Meas. Sci. Technol.* Vol. 4, pp 337~343, 1993.
11. S.M.Huang, J.Fielden, R.G.Green, M.S.Beck, "A New Capacitance Transducer for Industrial Applications", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 21, pp 251~256, 1988.
12. S.M.Huang, R.G.Green, A.Plaskowski, M.S.Beck, "A High Frequency Stray-immune Capacitance Transducer based on the Charge Transfer Principle", *IEEE Trans. Instru. Meas.*, Vol. 37, No. 3, pp 368 ~373, 1988.