

초정밀 스테이지용 변위 센서

김일해*, 김종혁+, 장동영**

A Gap Sensor Design for Precision Stage

Il Hae Kim*, Jong Hyuk Kim+, Dong Young Jang**

Abstract

A capacitive sensor is a proper device for measuring high small displacement. General design parameters and procedure are discussed and a test sensor was built to have a measuring range of 100 μ m and a sensitivity about 30nm. This sensor has two opposing electrode of comparably large area and has nominal gap distance about 150 μ m. So as to achieve a nano order displacement sensitivity, both sensor and target system have to be considered. This is important for the sensitivity can be achieved by minimizing a system total noise level in electronic type sensor application. Typical performance of the developed sensor is demonstrated in precision moving stage having 0.1 μ m moving resolution.

Key Words : capacitive, sensor, nano, large area

1. 서론

기구부의 정밀도가 수십 나노급에 해당하는 초정밀 단축 혹은 다축 이송 기구의 활용이 증가하고 있는데, 이러한 이송 기구의 정밀한 위치 제어를 위해서는 변위 센서 기술이 뒷받침이 되어야 한다. 본 논문에서는 관련된 변위 센서의 바람직한 설계 및 상용 센서를 활용할 경우에 필요한 제반 사항에 대해 살펴본다.

초정밀 변위 계측을 위해 사용되는 변위센서는 여러 가지 종류가 있으나, 분해능 측면에서 탁월한 성능을 보이는 것으로 정전용량형 변위 센서를 들 수 있다.

정전용량은 원리나 구조상 민감도나 분해능이 매우 우수하여 초정밀 분야에 다양하게 응용되고 있다. 정전용량 센서의 분해능 한계를 결정하는 것은 센서의 구조나 노이즈 특성 등 센서 및 그 회로의 실장 성능에 의해 좌우된다. 시스템에 적합한 효과적인 실장이 이루어진다면 민감도 측면에서 가장 유리한 센서라고 할 수 있다.¹

* (주)캡시스 (charlie@charliekim.net)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172
서울산업대 생산공학과 006호

+ 서울대학교 기계항공공학부

++ 서울산업대 산업정보시스템공학과

같은 맥락에서 상용의 고분해능 정전용량 변위 센서를 적용하는 경우에도 시스템에 대한 고려가 충분히 이루어져야 한다. 본 기술논문에서는 상용의 정전용량 변위 센서의 적용 요령 및 나노급 다축 이송계에 적합한 변위 센서의 특성 및 설계에 대해 살펴본다.

2. 정전용량 형 센서

정전용량 형 센서는 센서 전극 및 대상이 되는 피측정물 사이에 형성되는 전기장의 패턴에 의해 정전용량의 값이 결정된다. 마주보는 두 도체 사이의 정전용량은 다음과 같은 식으로 표현된다. ϵ 는 유전율, A 는 면적, x 는 틈새이다.

$$C = \epsilon \frac{A}{x} \quad (1)$$

즉, 마주보는 두 도체 사이의 거리가 가깝고, 면적이 클수록 높은 정전용량 값을 가지게 되며, 일반적으로 높은 민감도를 구현하고자 할 경우 틈새의 변화량을 정전용량 값으로 환산하여 변위를 측정하는 방식을 택한다. 정전용량을 형성하는 전극면과 측정 앰프 사이의 배선 등에서도 상당한 기생 정전용량이 포함되게 되어 오차로 작용하게 된다. 본 논문에서는 이러한 기생 정전용량을 최소화하기 위해 센서, 가드, 그라운드 사이의 전하를 스위칭을 통해 분배하여 전류적분기로 보내는 전하전달법을 사용하였다.^{2,3,4,5} 전류 적분기는 다음과 같은 회로로 요약되며, 간략화시킨 정전용량에 대한 전압 민감도는 다음 식(2)와 같다.

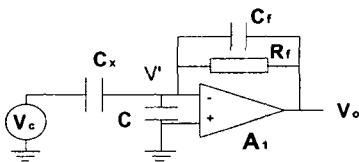


Fig.1 Current to voltage converter

$$\frac{dV_{so}}{dC_x} = -V_c f R_f \quad (2)$$

충전된 전하량에 대한 민감도는 충전 전압, 구동 주파수, 적분기의 저항값 등을 적절히 결정해야 하는데, 값이 클수록 민감해지지만 동시에 회로 실장에 따른 노이즈도 증가하

므로 적절한 수준을 결정해야 한다.

다음은 일반적인 적용에 적합한 원형 센서 전극 및 직사각형 형태의 스테이지에 적합한 긴 직사각형 모양의 센서 전극의 경우에 대해 센서 전극면 넓이, 기준 틈새 등으로 센서의 변위에 대한 전압 출력의 민감도를 계산해 본 것이다.

Table 1 Sensor parameter design

Parameter/Result	case I	case II
Gap	100 μ m	100 μ m
Sensor area	Φ 20mm	80x8mm ²
Frequency	1MHz	1MHz
R _f	40k Ω	50k Ω
V/pC	0.200	0.200
pC/ μ m	0.5645	1.141
Resolution [V/ μ m]	0.6773	1.369

위와 같은 설계 사양을 가지는 마주 보는 형태의 센서의 경우 출력단 전기 노이즈가 3mV 수준 달성이 가능하다면, 두 경우에 대해 얻을 수 있는 변위 분해능은 각각 4.4nm, 2.2nm 수준이다. 다음은 위 경우에 대한 마주 보는 각 센서의 정전용량 값 변화 및 앰프의 전압 출력을 계산한 것이다.

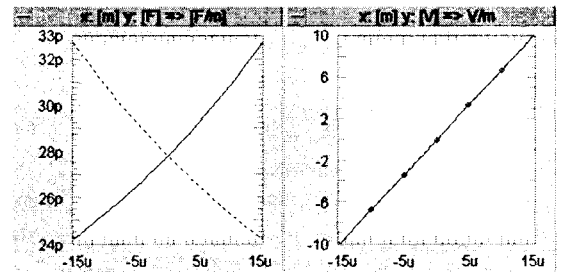


Fig.2 Amp output with displacement of case I

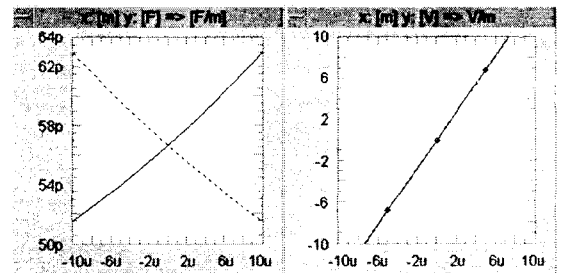


Fig.3 Amp output with displacement of case II

정전용량은 변위에 반비례하기 때문에 선형으로 변화하지 않지만 같은 형태의 센서를 마주보도록 하여 서로 빼주면 선형성이 높은 구간을 이용할 수 있다. 틸새의 변화가 정전용량에 반영되도록 하는 것이 민감도를 높이기 위해서는 보다 바람직하다.

구동 회로의 온도에 따른 저항값 변동, 센서 전극의 측정 물과의 틸새가 되는 공기층의 습도, 주파수 안정성, 아날로그 스위치 작동에 따른 charge injection 등 다른 오차 요인이 있기 때문에 실제 구현되는 분해능은 이 보다는 덜 나오겠지만, 화이트 노이즈 성분은 출력 전압의 적절한 신호처리를 통해 경감시킬 수 있다. 실제 회로의 구현에서 이러한 오차 요인을 가능하면 최소화시킬 수 있도록 소자의 선정 및 PCB 기판의 실장 설계에 주의를 기울여야 한다.

측정해야 되는 변위 정밀도가 수십 나노미터 급에 해당하는 경우 여러 가지 고려해야 될 사항이 있다.

가장 먼저 센서 자체의 측정 영역이 좁으면 다음 그림에서와 같은 이유로 측정 대상체의 형상 오차의 영향을 많이 받기 때문에, 센서 측정면을 넓게 하는 것이 바람직하다.

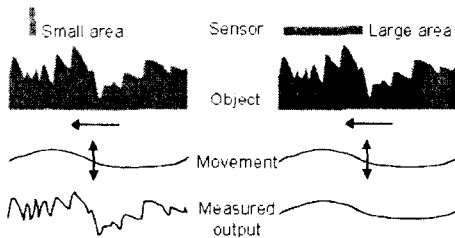


Fig.4 Sensor electrode size effect

시험 제작한 평판 센서의 경우 동전 모양의 센서 전극이 측정 대상물 양단에서 마주보고 그 차이를 검출하는 다음과 같은 형태이며, 테스트 용 미소 이송 테이블에 측정물이 장착되어 그 사이에서 움직이는 구조이다.

본 센서는 틸새 변화량을 측정하기 때문에, 요구 측정 범위가 넓은 경우 기준 틸새를 일정량 이상 유지해야 한다.

한편 틸새가 50 μm 이내로 가까워지는 경우 방전이 일어나 통전 상태가 되어버리고, 기준 틸새로부터 가까거나 먼 영역은 비선형 특성의 영향이 많이 나타나므로, 150 μm 정도의 측정 범위를 가지기 위해서는 틸새도 150 μm 정도로 설정하는 것이 기계가공오차를 고려한 실용적인 설계 수치가 된다. 센서 전극의 직경은 20mm로 제작하였으며, 이를 기준으로 센서의 기본 민감도를 계산하여 보면 마이크로 당 0.212V 정도의 출력이 나온다.

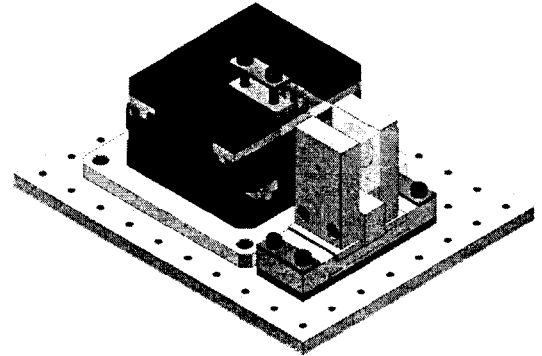


Fig.5 Capacitive sensor and linear table

다음 그래프에서와 같이 $\pm 10\text{V}$ 범위에서 100 μm 정도의 측정 범위를 보이게 된다. 테스트를 위해 사용하는 이송계의 최소 이송 단위가 0.1 μm 이기 때문에 민감도 및 측정 범위를 실험에 적합하도록 그에 맞춰 제작하였다.

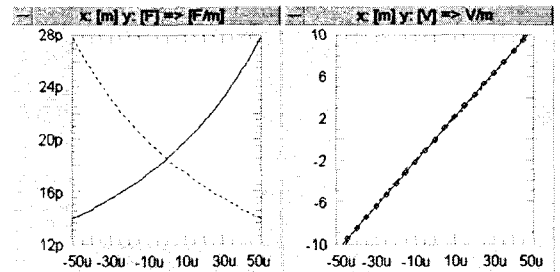


Fig.6 Sensor simulation for test system

상기 설계 사양의 경우 출력단의 노이즈 레벨이 3mV 수준 정도라고 가정하면 약 14nm 정도의 분해능을 얻을 수 있다. 그러나 센서 전극면을 연결하는 센서선 및 회로 내부 등 정전용량을 형성하는 외부 요소가 많기 때문에 적용된 시스템에 따른 오차가 많이 포함될 수 있다.

특히 정전용량 센서의 경우 측정 대상물의 전위 레벨 및 측정 앰프와의 전기적인 연결 상태에 따라 상당한 수준의 출력 차이를 보이기도 한다.

다음 결과는 상용 정전용량 형 변위 센서로 분해능이 0.1 μm 보다 나은 제품이다. 센서 전극면이 마주보고 있는 측정 대상체가 접지 상태인 경우와 비접지 상태인 경우의 출력값의 오차를 보여주는 것이다. 측정면이 전기적인 상태가 접지, 비접지로 바뀔때 따라 약 176 μm 의 차이를 보여주고

있다. 이는 센서 전극면 및 측정 전극면의 전기장 형성 패턴의 차이에 의한 것으로 정전용량 형 센서의 적용 시스템의 전기적인 환경에 따른 오차가 무시할 수 없는 수준임을 알 수 있는 것이다.

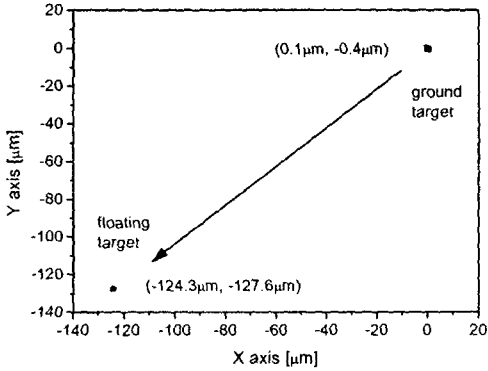


Fig.7 Sensor output signal in grounded and floating target situation

측정 대상물이 접지가 되어 있지 않은 경우에는 측정값이 대상물의 전기적인 상황에 따라 달라질 수 있으며, 노이즈가 많이 포함되는 경우도 있기 때문에, 높은 정밀도가 요구되는 경우에는 움직이는 대상물의 양단에서 차동 방식으로 변위를 검출하는 것이 바람직하다.

다음 사진은 언급된 설계 사양을 바탕으로 제작된 센서 앰프이며, 미소 이송 스테이지에서 단위 길이만큼 이송해 가며 실제 움직인 거리와 측정된 값을 살펴보았다.

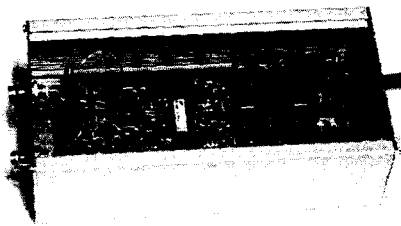
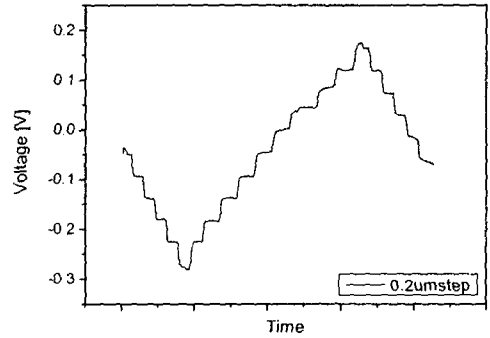


Fig.8 Capacitive sensor amp

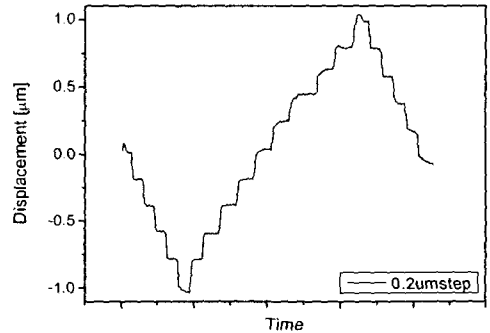
3. 실험 결과

다음은 제작된 센서 및 앰프의 실제 측정 신호를 최소 이송 단위 $0.1\mu\text{m}$ 인 이송축을 단위 길이만큼 이송해 가며 그때의 변위 신호를 측정하여본 결과이다. 마이크로 당 출력 전압은 검보정 결과 $220\text{mV}/\mu\text{m}$ 가량으로 측정되었으며, 센

서에서 계속된 변위의 움직임을 이어서 나타내었다. $0.2, 2, 8\mu\text{m}$ 단위로 이송한 후 잠시 멈췄다가 다시 이송하였다. 측정된 변위값은 센서 계인을 바탕으로 했기 때문에 y축에 표기된 수치만 다르나, 실제 움직인 변위와의 비교를 위해 이와 같이 표시하였다.



(a)



(b)

Fig.9 Step movement response by $0.2\mu\text{m}$: (a) voltage output (b) displacement output from capacitive sensor

$0.2\mu\text{m}$ 단위의 이송에서 출력 신호에 왜곡이 있는 것은 이송계의 성능 제약으로 인한 것으로 이동 후 정확한 위치로 찾아가는 데 시간 지연이 있었기 때문이다. 변위 센서에서의 출력은 전체 $\pm 1\mu\text{m}$ 범위의 이동에 대해서 그러한 미소한 움직임의 변화를 보여주고 있다. 사용한 Newport사의 이송계는 $0.1\mu\text{m}$ 분해능을 가지는 리니어 스케일을 내장하고 있으며, 위치 보정 모드로 동작할 때는 정확한 위치에 정지하기 위한 보정 움직임을 하게 되며, 그러한 움직임이 변위 센서에서 검출된 것으로 판단된다. 구간별로 지령받은 위치로 수렴하는데 걸린 시간이 차이나는 것은 수렴하는데 걸리는 시간이 차이나기 때문이다. 본 이송계의 제어는

HP-VEE 프로그램을 이용하여 GP-IB를 이용한 통신을 통해 이루어지는데, 단위 거리를 움직인 후 완전 정지한 후에 다음 거리를 이동하도록 하였다.

실제 센서의 측정 특성은 다음 두 경우에 보다 쉽게 확인할 수 있다. 각각 $2\mu\text{m}$, $8\mu\text{m}$ 단위로 이동을 시킨 것이다. $2\mu\text{m}$ 실험은 $\pm 10\mu\text{m}$ 범위에서 구동시켜본 것으로 설계 사양에서 권장할 수 있는 사용 범위라고 할 수 있으며, $8\mu\text{m}$ 단위로 약 $\pm 42\mu\text{m}$ 범위는 실제 전압 출력 값이 $\pm 10\text{V}$ 인 것으로 통상 데이터 수집 장치의 입력 범위에 해당한다.

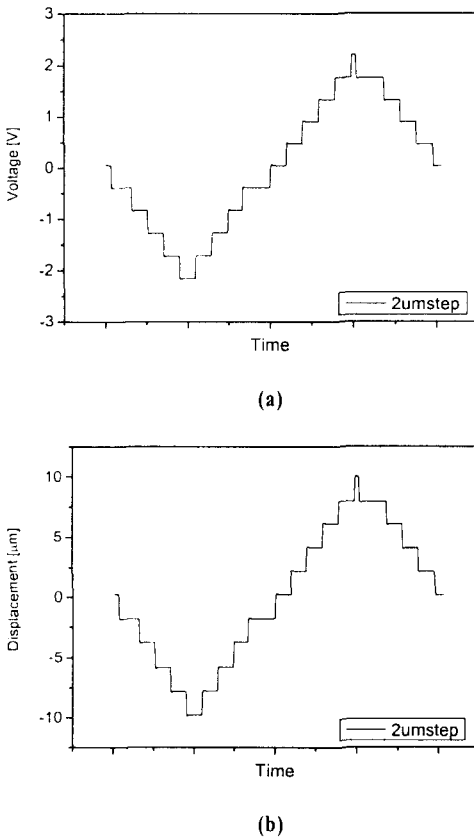


Fig.10 Step movement response by $2\mu\text{m}$: (a) voltage output, (b) displacement output from capacitive sensor

이송 과정에서 초기의 오버슈트가 약간씩 관찰되는 지점이 있기도 하며, 경우에 따라 완전 정지에 시간이 더 소요되기도 하는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로는 $\pm 10\mu\text{m}$ 구간 내에서의 양방향의 움직임을 변위 센서에서 정확하게 측정하고 있음을 알 수 있다.

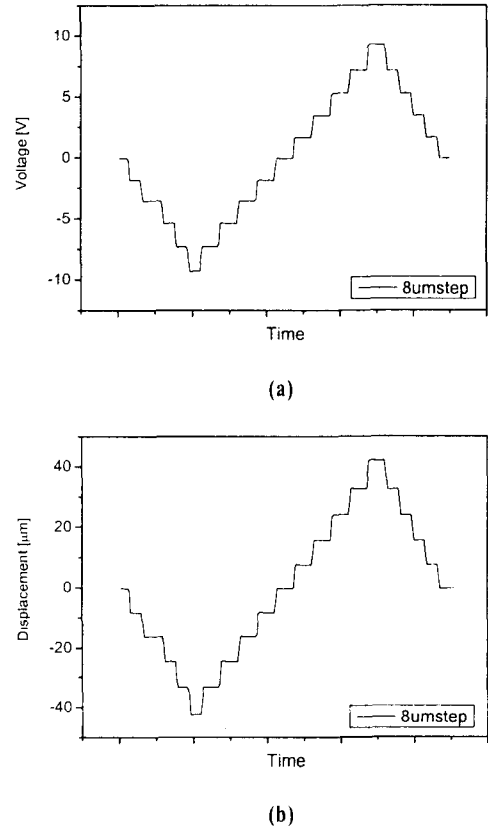


Fig.11 Step movement response by $8\mu\text{m}$: (a) voltage output, (b) displacement output from capacitive sensor

ADC 등 전압 출력값의 이용을 위해 센서 출력단에 시스템이 추가된 후의 노이즈 레벨은 실용상의 본 센서의 민감도를 결정짓는 중요한 요소이다. $\pm 10\text{V}$ 입력에 12비트 변환을 하기 때문에 전압 분해능은 4mV 수준이긴 하지만, 센서 출력 신호의 특성을 살펴보기 위해 이산화 된 신호를 분석하여 보았다.

데이터 샘플링 작업 자체도 노이즈를 수반하기 때문에 샘플링 주파수를 1kHz , 10kHz , 20kHz 로 세 가지 경우를 해 보았다. 이어지는 그림들에서 왼편은 원본 데이터, 오른편은 샘플링 주파수의 반, 즉, 10kHz 면 5kHz 로 차단주파수를 설정하여 3차 elliptic Lowpass 필터를 거친 후의 결과이다. 그래프 상에 표기된 최대 진폭 수치는 표시된 시간 동안의 데이터의 최대값에서 최소값을 뺀 값이다.

회로의 주요 부분의 스위칭 동작에 의한 저차의 노이즈 영향을 제외한 나머지 노이즈 성분들은 대개 화이트 노이즈

에 해당한다고 판단되며, 이러한 노이즈 성분은 적절한 Lowpass 필터에 의해 그 영향을 줄일 수 있다.

본 결과에서 센서의 측정 대상물인 리니어 스테이지는 전원 인가 및 정지 상태이다. 샘플링 주파수가 높을수록 약간 노이즈가 증가하는 경향이 있으며, 그 크기는 대략 20mV 가량으로 측정되었다. Matlab에 의한 필터링 후에는 대략 7mV 정도의 진폭이 측정되었으며, 이는 32nm 정도에 해당하는 셈이다. 한편 저차의 노이즈 성분은 모두 60Hz의 주파수로 전원 에 의한 영향이다. 센서 앰프의 전원 및 그라운드 설계를 개선하거나 적절한 디지털 필터를 통해 이에 대한 영향을 감소시킨다면 더 높은 정밀도를 얻을 수 있을 것이다.

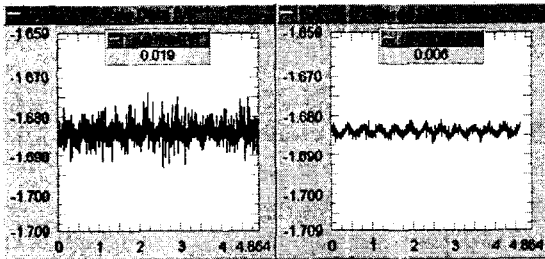


Fig.12 Noise level at sampling frequency 1kHz

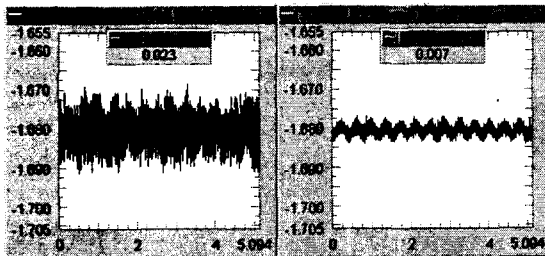


Fig.13 Noise level at sampling frequency 10kHz

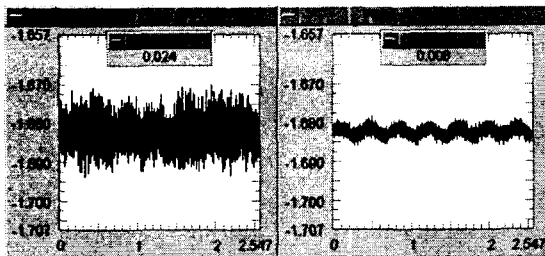


Fig.13 Noise level at sampling frequency 20kHz

4. 결론

나노급 초정밀 이송계 등 정밀한 변위 측정을 위해 마주 보는 한 쌍의 형태로 평판 정전용량 센서를 설계하는 과정에 대해 살펴보았다. 센서의 정밀도가 높아질수록 센서의 출력이 사용되는 시스템, 측정 시스템 등 전체 계에 대한 검토를 바탕으로 적합한 형태의 센서 설계 사양을 선정하는 것이 중요하며, 정전용량에서 그 특성의 변화를 이용하는 변위 센서는 매우 높은 정밀도의 변위 분해능을 실현하는데 적합하다. 실제 제작 사례를 통해 측정 범위 약 100 μ m, 전압 출력 ± 10 V, 센서의 측정 가능 주파수 대역을 포함하는 샘플링 주파수로 작동하는 AD 변환기 및 디지털 Lowpass 필터에 의한 신호처리 후 최소 32nm 이상의 변위 분해능을 가지는 변위 센서를 제작하였다. 측정 범위를 줄이고, 전원 노이즈를 개선하면 더 높은 분해능을 얻을 수 있을 것이다.

참고 문헌

- (1) Baxter, L. K., 1997, *Capacitive Sensors*, IEEE Press, New York, p. xiii.
- (2) Huang, S. M., Green, R. G., Plaskowski, A., and Beck, M. S., 1988, "A High Frequency Stray-Immune Capacitance Transducer Based on the Charge Transfer Principle," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.37, No.3, pp.368-373
- (3) Huang, S. M., Fielden, J., Green, R. G., and Beck, M. S., 1998, "A New Capacitance Transducer for Industrial Applications," *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 21, pp.251-256
- (4) Ahn, H. J., Jeon, S., and Han, D. C., 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, March, pp.102-107.
- (5) Kim, I. H., Kim, W. J., Jang, D. Y., and Han, D. C., 2001, "In-Process Sensing of Tool Wear and Process States Using a Cylindrical Displacement Sensor in Hard Turning," *J. of Engineering Manufacture / Proc. of IMECHE Part B*