

정전용량형 변위 센서 신호 처리 회로 개발 및 성능 평가

김종안[#], 김재완^{*}, 엄태봉^{*}, 강주식^{*}

Development of a Signal Conditioning Circuit for Capacitive Displacement Sensors and Performance Evaluation

Jong-Ahn Kim[#], Jae Wan Kim^{*}, Tae Bong Eom^{*} and Chu-Shik Kang^{*}

ABSTRACT

A signal conditioning circuit for capacitive displacement sensors was developed using a high frequency modulation/demodulation method, and its performance was evaluated. Since capacitive displacement sensors can achieve high resolution and linearity, they have been widely used as precision sensors within the range of several hundred micrometers. However, they inherently have a limitation in low frequency range and some nonlinearity characteristics and so a specially designed signal conditioning circuit is needed to handle these properties. The developed signal processing circuit consists of three parts: linearization, modulation/demodulation, and nonlinearity compensation. Each part was constructed discretely using several IC chips and passive elements. An evaluation system for precision displacement sensors was developed using a laser interferometer, a precision stage, and a PID position controller. The signal processing circuit was tested using the evaluation system in the respect of resolution, repeatability, linearity, and so on. From the experimental results, we know that a highly linear voltage output can be obtained successfully, which is proportional to displacement and the nonlinearity of output is less than 0.02% of full range. However, in the future, further investigation is required to reduce noise level and phase delay due to a low-pass filter. The evaluation system also can be applied effectively to calibration and evaluation of precision sensors and stages.

Key Words : Capacitive displacement sensor (정전용량형 변위 센서), Laser interferometer (레이저 간섭계), Precision stage (정밀 스테이지)

1. 서론

정전용량형 변위 센서는 수 백 μm 이하의 측정 범위에서 나노미터 수준의 높은 분해능을 얻을 수 있어 정밀 변위 측정을 위해 널리 사용되고 있다. 이러한 변위 센서는 레이저 간섭계에 비해 측

정 범위가 제한되는 단점을 가지고 있지만, 구조가 간단하고 크기가 작기 때문에 측정 대상물의 크기와 형상에 제한되지 않고 용이하게 적용될 수 있는 장점을 갖는다. 이와 같은 특징으로 인하여 정전용량형 변위 센서는 정밀 스테이지의 되먹임 위치 제어 회로 구성, 제한된 측정 범위에서 높은

접수일: 2007년 3월 29일; 게재승인일: 2007년 7월 5일

교신저자: 한국표준과학연구원 기반표준부 길이/시간그룹

E-mail: jakim@kriss.re.kr Tel. (042) 868-5683

* 한국표준과학연구원 기반표준부 길이/시간그룹

선형성이 요구되는 정밀 변위 측정 등에 널리 이용되고 있다.¹ 또한, 전극의 형태를 용이하게 변형할 수 있기 때문에 다양한 형태로 설계된 전극을 이용하여 회전축의 운동 측정이나 정밀 정렬 작업에도 응용되고 있다.^{2,3} 그러나 정전용량형 변위 센서를 이용하여 변위에 비례하는 전기 신호를 얻기 위해서는 다소 복잡한 신호 처리 회로가 필요하고, 여러 가지 요인으로 인하여 발생하는 비선형적인 특성을 최소화하기 위한 설계와 보정 작업이 필요하다.

정전용량형 변위 센서는 두 전극 사이에서 형성되는 정전용량의 변화를 전기 신호화하여 변위를 측정한다. 정전용량형 변위 센서 시스템은 정전용량을 형성하기 위한 전극 (electrode)과 정전용량 변화를 선형적인 전기 신호로 변환하기 위한 신호 처리 회로로 구성된다.

전극의 구성 형태는 측정 대상물의 한 면과 하나의 전극으로 구성된 경우와 두 개의 전극으로 구성된 경우로 구분된다. 전자의 경우에는 도체인 측정 대상물의 한 면을 접지시켜 전극 역할을 하도록 하기 때문에, 적용이 보다 쉽다는 장점을 갖는다. 그러나 전극의 역할을 하는 대상물 표면의 특성에 영향을 받는 단점을 갖는다. 후자의 경우에는 측정 대상물에 부가적인 전극을 부착하여야 하기 때문에, 적용이 제한되는 단점을 갖는다. 그러나 정전용량을 형성하는 두 전극의 상태를 엄격히 제어할 수 있기 때문에, 보다 높은 측정 성능을 얻을 수 있다.

전하밀도법을 이용한 정전용량형 센서의 전극 설계 방법과 특성 해석에 대한 연구 결과가 발표되었고⁴ 정전용량에 따른 고주파 변조 신호의 주파수 변화를 이용한 정전용량형 변위 센서의 신호 처리 방법에 대한 논문도 발표되었다.⁵

본 논문에서는 정전용량형 변위 센서의 측정 원리와 신호 처리 회로의 구성에 대하여 설명한다. 레이저 간섭계, 정밀 스테이지, 위치 제어기를 이용하여 정밀 센서 평가 시스템을 구성하고 이를 이용하여 제작된 신호 처리 회로의 성능 평가 실험을 수행한다.

2. 측정 원리

정전용량형 변위 센서의 두 전극 사이에 형성되는 정전용량 C 는 식 (1)과 같이 표현된다. ϵ_r 은

전극간 매질의 상대 유전율 (permittivity), ϵ_0 는 진공에서의 유전율, A 는 두 전극의 겹침 면적, d 는 두 전극 사이의 간극을 각각 나타낸다.

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

식 (1)에서 나타난 것과 같이 두 전극 사이의 겹침 면적과 간극에 따라 정전용량이 변화되고, 이를 이용하여 변위를 측정할 수 있다. 그런데 간극 변화를 이용하는 경우가 겹침 면적 변화를 이용하는 경우에 비해 100 배 정도 높은 측정 민감도를 얻을 수 있기 때문에, 정밀 변위 측정을 위해서는 간극 변화 방식을 적용한 정전용량형 변위 센서가 널리 사용된다. 그러나 간극 변화에 따른 정전용량 변화를 선형적인 전기 신호로 변환하기 위해서는 간극 변화가 정전용량 변화와 반비례하는 점을 해결하고 낮은 주파수의 간극 변화도 측정할 수 있는 신호 처리 회로의 개발이 필요하다.¹ 이러한 문제점을 해결하기 위해서 연산 증폭기 (operation amplifier)와 고주파로 변조된 신호를 이용하는 방법이 대표적으로 적용된다(Fig. 1).⁶

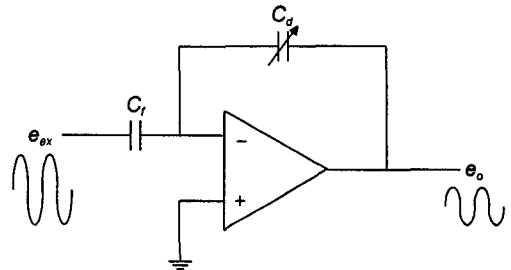


Fig. 1 Linearization of the relationship between the variations of capacitance and the gap of sensor electrodes using an operational amplifier and a high frequency modulation

정전용량이 고정된 콘덴서의 정전용량 C_f 와 변위 센서의 두 전극으로 구성된 가변 콘덴서의 정전용량 C_v 를 이용하여 Fig. 1 과 같은 반전 증폭 회로를 구성한다. 연산 증폭기의 입력 단에 고주파로 변조된 입력 신호 e_{ex} 를 인가해 주면, 연산 증폭기의 출력 단에서는 변조 출력 신호 e_o 를 얻을 수 있다. 연산 증폭기의 특성을 고려하면, 이러한 입력 단과 출력 단 변조 신호 진폭 간의 관계

식은 식 (2)와 같이 구해진다.

$$E_o = -\frac{C_f}{C_d} \cdot E_{ex} = -\frac{C_f \cdot E_{ex}}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A} \cdot d = K \cdot d \quad (2)$$

E_o 와 E_{ex} 는 각각 출력 단과 입력 단의 변조 신호의 진폭을 나타낸 것으로 진폭의 크기 비는 고정 콘덴서와 가변 콘덴서의 정전용량 크기 비로 결정된다. 변위 센서의 전극들로 구성된 가변 콘덴서의 정전용량을 식 (1)을 이용하여 정리하면 출력 단의 변조 신호의 진폭이 전극 사이의 간격 d 와 비례하게 됨을 알 수 있다. 따라서 출력 단 변조 신호의 진폭 변화를 이용하여 두 전극이 부착된 측정 면 간의 변위를 측정할 수 있다.

3. 신호 처리 회로

정전용량형 변위 센서의 두 전극 사이 간극 변화를 선형화된 전기 신호로 변환하기 위한 신호 처리 회로는 크게 3개 부분으로 구성된다. 변위와 고주파 변조 신호 진폭의 관계를 선형화시키기 위한 부분, 고주파 변조 신호 발생과 변위와 비례한 변조 신호의 진폭을 복조시키기 위한 부분, 그리고 출력 신호의 비선형성을 보정하기 위한 부분으로 구성된다.

3.1 선형화 회로

정전용량형 변위 센서의 간극 변화와 고주파 변조 신호 진폭 변화의 관계를 선형화시키기 위한 부분으로써, Fig. 1과 같이 연산 증폭기를 이용하여 구성된다. 선형화 회로의 비례 상수 K 는 식 (2)와 같이 정전용량이 고정된 콘덴서의 정전용량 C_f 와 변위 센서의 두 전극으로 구성된 가변 콘덴서의 정전용량 C_d 의 비로 결정되기 때문에 고정 콘덴서는 온도 변화와 같은 환경 변화에 대한 민감도가 낮은 정밀 콘덴서가 사용되어야 한다.

연산 증폭기를 이용한 선형화 회로는 콘덴서를 이용한 적분 기의 구성을 가지고 있기 때문에, 연산 증폭기 입력 양단 간에 바이어스 전류가 존재할 때에는 연산 증폭기의 출력 값이 급격히 포화된다. 따라서 매우 작은 바이어스 전류를 갖는 연산 증폭기가 선택되어야 한다. 그러나 매우 작은 바이어스 전류가 존재하더라도 시간이 지남에 따라 연산 증폭기 출력 값이 서서히 증가 또는 감소되는 드리프트가 나타난다. 따라서 이러한 문제

점을 해결하기 위해서 연산 증폭기의 출력 값을 로우패스 필터를 통과시킨 뒤 연산 증폭기 양의 입력 단에 연결시켜 주어 매우 낮은 주파수로 변화되는 바이어스 전류로 인한 드리프트를 제거할 수 있도록 설계하였다.

선형화 회로에 사용된 연산 증폭기의 바이어스 전류 크기는 25 pA 이하이다. 로우패스 필터의 컷오프 주파수를 30 Hz로 설정하여 수십 kHz 이상의 변조 주파수를 갖는 변위 측정 신호에 영향을 주지 않고 선형화 회로 출력 값의 드리프트를 제거할 수 있도록 하였다.

3.2 변조/복조 회로

변조/복조 회로에서는 수십 kHz 이상의 주파수를 갖는 변조 신호를 선형화 회로에 인가하고 변위 센서 두 전극의 간극 변화에 의해 진폭이 변화되는 선형화 회로의 출력 신호를 다시 복조하여 간극 변화에 비례하는 전압 신호를 얻는다. 이러한 회로를 구성하기 위해서는 주파수가 수십 kHz 이상 되는 사인파 신호를 발생시킬 수 있는 회로, 고주파 변조 신호의 진폭을 측정하는 회로, 전압 오프셋과 이득값 조절 회로 등 여러 가지 회로가 복합적으로 구성되어야 한다.

본 신호 처리 회로에서는 MAXIM社의 MAX038 high-frequency waveform generator를 이용하여 변조 입력 신호를 발생시킨다.⁷ 이를 이용하면 0.1 Hz에서 20 MHz 주파수 범위의 여러 가지 형태의 파형을 만들 수 있다. 선형화 회로 출력 신호의 진폭 변화를 측정하기 위해서는 Analogue Device社의 AD637 high precision, wideband RMS-to-DC converter를 이용한다.⁸ AD637를 이용하면 변조된 출력 신호의 진폭 변화와 비례하는 전압 신호를 얻을 수 있다. 그러나 출력된 전압 신호에는 변조 신호 성분이 포함되어 있기 때문에 이를 제거하기 위한 로우패스 필터가 추가되어야 한다. 본 회로 구성에서는 Butterworth 형태의 -80 dB 로우패스 필터를 복조 회로 출력단에 구성하고 출력 값의 영점 조절과 이득값 조절을 위한 회로도 추가하였다.

3.3 비선형성 보정 회로

식 (2)에서 나타난 것과 같이 정전용량형 변위 센서 두 전극의 간극 변화와 선형화 회로 출력 값의 진폭은 서로 비례한다. 그러나 실제에 있어서

는 센서 전극 형상의 에지 효과, 전극 면간의 평행도와 전극면의 평면도 등과 같은 여러 가지 요인에 의하여 비선형적인 특성이 나타나게 된다.¹ 센서 출력값의 비선형 정도는 위에서 언급한 요인의 크기에 따라 다르게 나타나지만 수 % 정도의 비선형 오차가 나타나기도 한다. 따라서 정전용량형 변위 센서의 측정 정확도를 향상시키기 위해서는 이러한 비선형성을 보정하기 위한 회로가 반드시 필요하다.

본 신호 처리 회로에서는 3 차 다항식 회로를 이용하여 센서 출력값의 비선형성을 보정한다. 비선형성 보정 회로는 아날로그 칩셋 연산기인 Analogue Device 社의 AD633 을 이용하여 복조 회로 출력 값의 2 제곱과 3 제곱 신호를 각각 만든다.⁹ 그리고 각 신호값의 크기를 정밀하게 조절할 수 있는 단위 이득 조절 증폭기를 구성하고, Fig. 2 와 같이 세가지 신호를 합하여 최종 출력값을 결정한다.

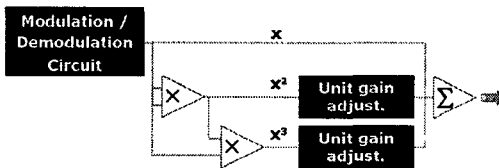


Fig. 2 Composition of a nonlinearity compensation circuit using the 3rd order polynomial

4. 정밀 변위 센서 평가 시스템

신호 처리 회로의 설계 변수를 결정하고 성능을 평가하기 위해서는 이와 같은 정밀 변위 센서 시스템을 평가하고 교정할 수 있는 측정 시스템이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 3 과 같이 레이저 간섭계를 이용한 정밀 변위 센서 평가 시스템을 구성하였다. 평가 시스템은 변위 측정을 위한 레이저 간섭계, 변위 센서를 장착하여 변위를 발생시킬 수 있는 정밀 스테이지, 그리고 변위 센서의 출력값을 이용하여 되먹임 위치 제어 회로를 구성할 수 있는 PID 제어기로 구성된다.

레이저 간섭계로는 RENISHAW 社의 RLE10 을 이용하였다. 광 섬유를 이용하여 레이저 광을 유도할 수 있고 센서 헤드 형태로 구성되었기 때문에 정렬이 용이하고 좁은 공간에 설치가 가능하다.

따라서 정밀 변위 센서나 이와 결합된 정밀 스테이지의 성능 평가에 용이하게 적용될 수 있다. 그러나 A/B 상 형태로 출력되는 디지털 신호의 분해능은 10 nm 로 제한되기 때문에, 부가적으로 출력되는 간섭계의 sine/cosine 위상 신호를 이용하여 변위 측정값을 계산함으로써 위치 측정 분해능을 1 nm 이하로 낮출 수 있다. 또한 비선형성 보정 방법을 추가적으로 적용하여 비선형성이 제거된 변위값을 얻을 수 있다.¹⁰

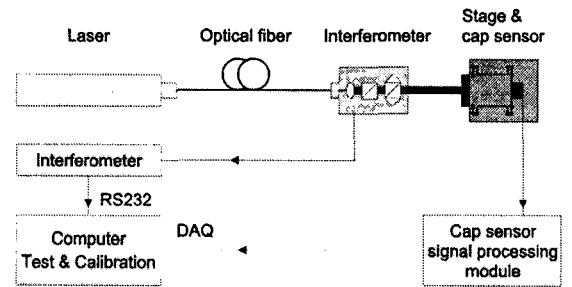


Fig. 3 Configuration of the evaluation system for precision displacement sensors

정밀 스테이지는 PZT 소자와 탄성 힌지 구조물을 이용하여 제작되었으며 120 μm 정도의 구동 범위를 갖는다. 또한 PID 위치 제어기로는 National Instruments 社의 NI 7354 Motion Controller 를 이용하였는데, 아날로그 또는 디지털 형태의 변위 센서 출력 신호를 이용하여 되먹임 위치 제어 회로의 구성이 가능하다.

정밀 변위 센서 평가 프로그램의 주요 화면은 Fig. 4 와 같다. 평가 프로그램은 LabVIEW 를 이용하여 작성되었고 이를 이용하여 정밀 변위 센서 평가의 주요항목인 분해능, 반복도, 선형성 등을 평가할 수 있다.

평가 프로그램에서는 변위 센서의 평가를 위해 변위 센서가 부착된 정밀 스테이지에 구동 입력을 발생시키고 평가하려는 변위 센서와 평가 시스템의 레이저 간섭계 신호를 동시에 기록한다. 그리고 기록된 변위 측정값들을 서로 비교하여 변위 센서의 성능을 평가한다. 정밀 스테이지의 구동 입력은 평가 항목에 따라서 구동 전압의 진폭, 주기, 형태를 자유롭게 조절할 수 있고, 변위 센서 출력값의 비선형성을 보정하기 위하여 다항식 곡선 맞춤을 수행할 수 있는 기능도 추가하였다.

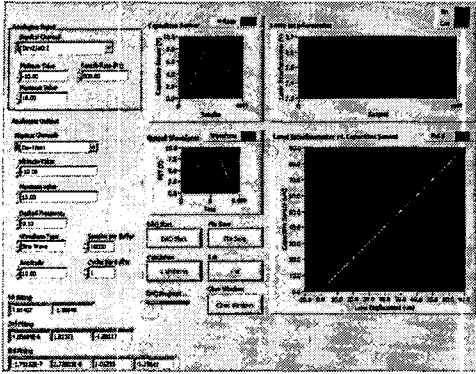


Fig. 4 Main program of the evaluation system for precision displacement sensors

5. 성능 평가 실험

4 장에서 설명한 정밀 변위 센서 평가 시스템을 이용하여 신호 처리 회로의 설계 파라미터를 결정하고 성능을 평가한다.

5.1 설계 파라미터 결정

신호 처리 회로의 대역폭을 증가시키기 위해서는 최종 출력단의 변조 신호 성분을 제거하기 위한 로우패스 필터의 컷오프 주파수가 높게 설정되어야 한다. 그러나 또한 컷오프 주파수는 변조 신호 성분을 제거하기에 충분하도록 낮게 설정되어야 한다. 따라서 이러한 두 가지 조건을 동시에 만족시키기 위해서는 변조 주파수를 최대한 높게 설정해주어야 한다.

신호 처리 회로의 변조 주파수를 결정하기 위해 정밀 변위 센서 평가 시스템을 이용하여 100 μm 정도의 변위가 발생되도록 삼각파 형태의 구동 입력을 변위 센서가 장착된 정밀 스테이지에 인가하고 변조 주파수 변화에 따른 신호 처리 회로의 선형성과 위상 지연 효과를 평가하였다. 실험에 사용된 정전용량형 변위 센서의 전극은 자체적으로 제작된 것으로 측정 면의 면적은 67.7 mm^2 이고 공칭 정전용량은 4.7 pF 이다. 1 Hz의 삼각파 입력 신호를 정밀 스테이지에 인가하고 레이저 간섭계와 정전용량형 변위 센서를 이용한 변위 측정값을 동시에 기록하였고 변조 신호 성분을 제거하기 위해 사용된 로우패스 필터의 컷오프 주파수는 2 kHz로 고정하였다.

Figure 5는 레이저 간섭계와 정전용량형 변위

센서를 이용하여 측정된 변위값을 각각 x 축과 y 축으로 설정한 뒤 3 차 곡선 맞춤을 하였을 때 남는 유수값 (residue)를 나타낸 것이다. 결과에서 보면 변조 주파수가 증가될수록 변위 센서 측정값의 비선형성도 함께 증가됨을 알 수 있다. 이는 복조 회로 구성에 사용된 AD637의 비선형성에서 기인된 것으로 변조 주파수를 100 kHz 정도로 설정해야 3 차 다항식을 이용하여 비선형성을 충분히 보정할 수 있다.

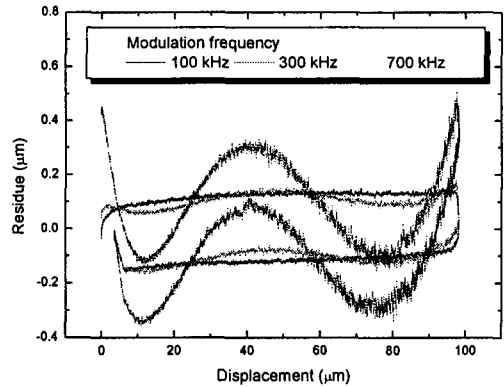


Fig. 5 Residues obtained by a curve fitting using the 3rd order polynomial (laser interferometer vs. capacitive displacement sensor)

측정 결과에서 보면 신호 처리 회로의 위상 지연 효과로 인해 정방향과 역방향 변위에 대한 유수값의 차가 발생된다. 그러나 그 크기는 변조 주파수와 직접적인 관계가 없음을 알 수 있고 주로 로우패스 필터 부분에서 발생된다. 위의 평가 결과로부터 신호 처리 회로의 변조 주파수는 100 kHz, 로우패스 필터의 컷오프 주파수는 변조 주파수의 1/10인 10 kHz로 각각 설정하였다.

5.2 성능 평가

제작된 정전용량형 변위 센서 신호 처리 회로의 사진은 Fig. 6과 같다. 5개의 가변 저항을 이용하여 출력값의 영점과 선형 이득 값을 조절할 수 있고 비선형성을 보정할 수 있다.

정밀 변위 센서 평가 시스템을 이용하여 이와 같이 제작된 신호 처리 회로의 성능을 평가한다. 평가에 사용된 변위 센서 전극과 측정 조건은 설계 파라미터 결정 과정과 동일하다.

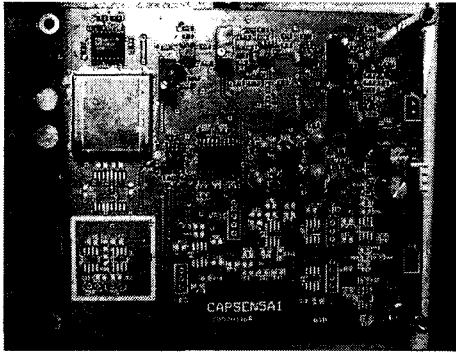


Fig. 6 Prototype of a signal conditioning circuit for capacitive displacement sensors

5.2.1 분해능

변위 센서의 분해능을 평가하기 위해서 신호 처리 회로의 출력값을 10 kHz의 샘플링 레이트로 1 초간 기록하였다(Fig. 7). 아날로그 센서의 분해능은 잡음 수준의 표준편차를 이용하여 평가할 수 있다. 출력값의 표준 편차는 0.4 mV 정도이고 100 μm 범위에서 0 ~ 10 V의 전압값이 출력되도록 선형 이득값이 설정되었기 때문에, 이는 4 nm에 해당되는 분해능이다.

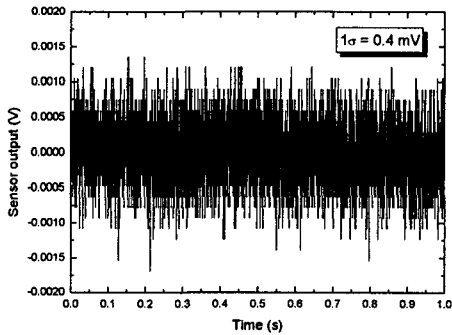


Fig. 7 Acquisition of the voltage output of signal conditioning circuit for the evaluation of noise level

5.2.2 반복도

정전용량형 변위 센서의 위치 측정 반복도를 평가하기 위해 PID 제어를 이용하여 변위 센서가 장착된 정밀 스테이지의 위치 제어가 가능하도록 구성하였다. 1 V에서 2 V로 증가되는 계단 형태의 기준 입력을 인가하고 정밀 스테이지의 위치

가 정상 상태에 도달한 뒤, 레이저 간섭계와 변위 센서를 이용하여 얻어진 위치 측정값을 1 초간 기록하였다. 이러한 측정을 21 회 반복 수행하고 두 가지 방법으로 얻어진 위치 측정값을 비교하였다. 잡음 수준의 영향을 제거하기 위하여 각 회 측정에서 얻어진 1 초간의 위치 측정값의 평균을 이용하였다(Fig. 8).

결과에서 보면 두 측정값의 편차는 $\pm 1.5 \text{ nm}$ 정도의 범위에 존재하였고, 표준편차는 0.94 nm 수준으로 나타났다. 1 초 간의 측정 데이터의 평균값을 비교한 것이기 때문에 분해능에 비해서 더 높은 반복도를 얻을 수 있었다.

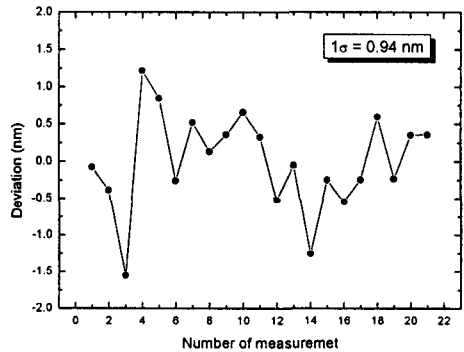


Fig. 8 Experimental results of the repeatability evaluation of the signal conditioning circuit

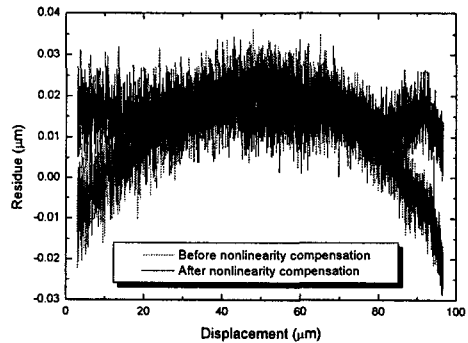


Fig. 9 Experimental results of the evaluation of nonlinearity compensation and linearity of the signal conditioning circuit

5.2.3 선형성

신호 처리 회로의 비선형성 보정 회로 성과

최종적인 센서 출력값의 비선형성을 평가하기 위해서 정밀 스테이지에 0.1 Hz 삼각파 입력을 넣어 주고 레이저 간섭계와의 위치 측정값을 비교하였다.

Figure 9 는 두 측정 결과를 이용하여 선형 맞춤을 하였을 때, 비선형성 보정 전후의 우수값을 나타낸 것이다. 결과에서 보면 비선형성 보정 회로를 이용하여 보정 전에 나타난 비선형성을 효과적으로 보정할 수 있음을 알 수 있다. 보정후의 비선형 오차는 20 nm 수준으로 전체 측정 영역의 0.02 % 수준으로 보정할 수 있었다.

5.2.4 위상 지연 효과

신호 처리 회로의 최종 출력단에 나타나는 변조 신호 성분을 제거하기 위해서 사용되는 로우패스 필터로 인해 센서 측정값에 위상 지연 효과가 발생된다. 로우패스 필터의 컷오프 주파수를 낮출수록 잡음 수준은 감소되지만 위상 지연 효과는 더욱 증가된다. 정밀 스테이지에 1 Hz 사인파 입력을 인가하였을 때, 컷오프 주파수의 변화에 따라 나타나는 위상 지연 효과는 Fig. 10 과 같다.

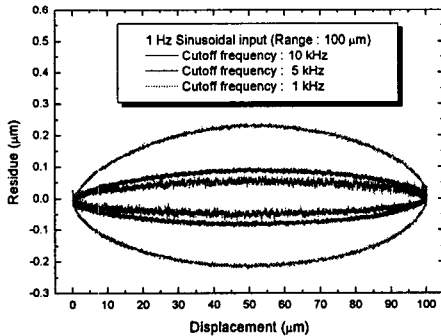


Fig. 10 Experimental results of phase delay effect according to the cutoff frequency of lowpass filter

이 결과는 레이저 간섭계와 변위 센서 측정값을 선형 맞춤 하였을 때의 우수값으로 정방향 구동과 역방향 구동에 대한 측정 결과를 함께 나타낸 것이다. 결과에서 보면 컷오프 주파수가 감소될수록 레이저 간섭계를 이용한 측정값과의 차가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 이러한 위상 지연 효과는 정밀 스테이지의 구동 속도와도 관계

된다. 구동 속도가 감소되는 양 끝점에서는 위상 지연 효과가 감소되지만 구동 속도가 최대가 되는 중간 부분에서는 위상 지연 효과도 최대가 된다.

Figure 11 은 로우패스 필터의 컷오프 주파수가 10 kHz 일 때, 여러 가지 주파수의 사인파 구동 입력에 대해 나타나는 위상 지연 효과를 측정한 결과이다.

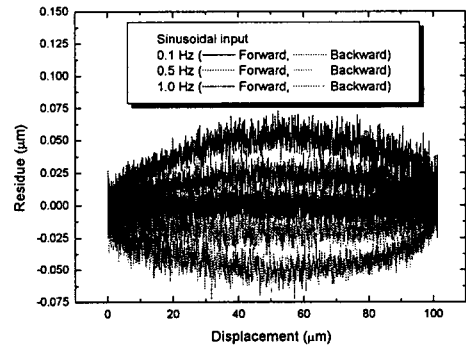


Fig. 11 Experimental results of phase delay effect according to the driving frequency of the precision stage

구동 입력 주파수가 증가될수록 위상 지연 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 1 Hz 입력의 경우, 위상 지연 효과로 인해 두 측정값의 차가 ± 50 nm 까지 나타난다.

5.2.5 안정도

Figure 12 는 정밀 스테이지의 정지 상태에서 레이저 간섭계와 변위 센서의 측정값을 6 시간 동안 기록한 것이다. 이러한 측정값의 변화는 주로 온도 변화에 의한 스테이지의 열팽창에서 기인한 것으로 두 측정값은 거의 동일한 변화 경향을 나타냄을 알 수 있다.

신호 처리 회로의 전압 출력값은 교정된 선형 이득값과 곱해서 변위값으로 변환된다. 따라서 이러한 선형 이득값의 교정 정확도와 이득값의 안정도가 중요하다. 정밀 변위 센서 평가 시스템을 이용하여 교정된 선형 이득값의 불확도는 레이저의 파장, 간섭계의 비선형성 등 여러 가지 불확도 요인을 고려할 때 $1E-7$ 이하의 상대 불확도를 갖는다. 따라서 전체적인 선형 이득값의 교정 불확도에서는 교정 반복도가 주요한 불확도 요인이 된다.

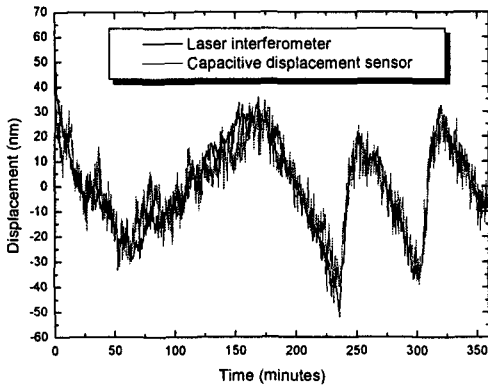


Fig. 12 Experimental results of a long-term drift of the signal conditioning circuit

교정 안정도를 평가하기 위해서 온도가 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 범위에서 제어되는 실험실에서 1 시간 간격으로 선형 이득값을 10 회 교정하고 그 값의 안정도를 평가하였다. 교정된 이득값들의 표준 편차는 $4\text{E}-5$ 수준으로 평가되었고 이로 인해 발생하는 측정 불확도는 $100\text{ }\mu\text{m}$ 측정 범위에서 약 4 nm 수준이다.

6. 결론

본 연구에서는 정전용량형 변위 센서를 위한 신호 처리 모듈을 개발하고 정밀 변위 센서 평가 시스템을 이용하여 그 성능을 평가하였다. 신호처리 모듈은 선형화 회로, 변조/복조 회로, 비선형성 보정 회로로 구성되며 센서 전극 사이의 간극 변화를 선형화된 전기 신호로 변환 할 수 있다.

레이저 간섭계, 정밀 스테이지, 위치 제어기 등을 이용하여 정밀 센서 평가 시스템을 구성하고 개발된 신호 처리 모듈의 잡음 수준, 반복도, 선형성, 위상 지연 효과, 안정도 등을 평가하였다. 전체 측정 영역에서 비선형성이 0.02% 이하인 위치 측정값을 얻을 수 있었다. 그러나 변위 센서의 분해능이 약 4 nm 수준으로 다소 높고, 로우패스 필터로 인한 위상 지연 효과가 나타나는 점은 개선되어야 한다. 이를 위해서는 잡음 감소 방법과 필터 특성 향상에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다. 개발된 정밀 변위 센서 평가 시스템은 정전용량형 변위 센서뿐만 아니라 여러가지 정밀 변위 센서나 스테이지 평가에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산자부 나노핵심기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Hicks, T. R. and Atherton, P. D., "The NanoPositioning Book," Queensgate Instruments Ltd., 1997.
- Kim, J. H., Ahn, H. J. and Jang, D. Y., "A novel cylindrical capacitive sensor for both radial and axial motion measurements," J. of KSPE, Vol. 22, No. 6, pp. 30-39, 2005.
- Choi, G. H., Kim, B. H., Kim, H. Y. and Chang, I. B., "The development of punch-die aligning algorithm in micro punch system with using the total capacitance," J. of KSPE, Vol. 20, No. 7, pp. 114-119, 2003.
- Ahn, H. J., Chang, I. B. and Han, D. C., "A study on a capacitive displacement sensor for the ultraprecision measurement," J. of KSPE, Vol. 14, No. 11, pp. 110-117, 1997.
- Restagno, F., Crassous, J., Charlaix, E. and Monchanin, M., "A new capacitive sensor for displacement measurement in a surface-force apparatus," Meas. Sci. Technol., Vol. 12, No. 1, pp. 16-22, 2001.
- Doebelin, E. O., "Measurement Systems: Application and Design," McGraw Hill, 1990.
- Maxim, "MAX038: High-Frequency Waveform Generator," Maxim, 2005.
- Analog Devices, "AD637: High Precision, Wideband RMS-to-DC Converter," Analog Devices, 2005.
- Analog Devices, "AD633: Low Cost Analog Multiplier," Analog Devices, 2000.
- Wu, C. M., Su, C. S. and Peng, G. S., "Correction of nonlinearity in one-frequency optical interferometry," Meas. Sci. Technol., Vol. 7, No. 4, pp. 520-524, 1996.