

## 광/엑스선 복합간섭계를 이용한 나노미터 영역의 변위 측정 및 transducer의 비선형 교정

박진원\*, 조재근, 변상호, 엄천일 (한국표준과학연구원)

Displacement measurement in nanometer region and calibration of transducers using combined optical and x-ray interferometer

Jinwon Park, Jaegun Jo, Sangho Byun, and Cheonil Eom.

### ABSTRACT

현재 정밀한 길이를 측정하기 위해서는 광 간섭계를 이용한 측정기술이 주로 사용되어지고 있다. 이러한 광 간섭계의 발전과 더불어 이보다 더 높은 분해능을 얻기 위해 광파장보다 1000배 정도 짧은 엑스선을 이용한 변위 측정 기술개발이 진행되고 있다. 본 연구에서는 이러한 엑스선을 이용한 간섭계를 제작하고, 광 간섭계와 결합된 광/엑스선 복합간섭계를 구성하여 광 간섭계가 안고 있는 자체의 비선형성이 제거된 정밀 변위 측정 시스템을 구성하였다. 그 응용으로써, 제작된 광/엑스선 복합간섭계를 이용하여 나노미터 영역에서 사용하는 transducer의 비선형성을 측정하였다.

**Key Words** : Combined optical and x-ray interferometer, calibration of transducer, non-linear error.

### 1. 서론

나노미터 영역의 변위 측정기술은 첨단 과학기술의 발전과 함께 중요한 기술로 다루어지고 있다. 정밀성과 정확성이 높은 측정 장치의 개발은 많은 분야에서 응용할 수 있는 중요한 측정 도구가 될 수 있으며, 현재 정밀한 길이를 측정하기 위해서는 광 간섭계를 이용한 측정기술이 주로 사용되어지고 있다. 광 간섭계는 높은 분해능을 가지고 있으며, 길이, 각도, 거칠기, 등 다양한 분야에서 응용되어진다.

이러한 광 간섭계의 발전과 더불어 이보다 더 높은 분해능을 얻기 위한 노력들이 많은 과학자들에 의해 이루어지고 있으며, 그 한 예로 광파장보다 1000배 정도 짧은 엑스선을 이용한 변위 측정 기술 개발이 약 40 년 전부터 진행되고 있다.[1,2]. 1965년 독일의 Bonse와 Hart는 엑스선 간섭계를 개발하여 변위 측정에 응용하였으며, 이를 이용하여 실리콘 결정의 격자상수를 높은 정확도로 측정할 수 있었다. 엑스선 간섭계를 이용한 격자상수 측정은 미국의 NIST, 독일의 PTB, 이탈리아의 IMGC, 일

본의 NMIJ 등 여러 나라에서 수행되고 있다.[3,4]

엑스선 간섭계를 이용한 정밀 변위 측정 기술은 광 간섭계와 결합된 구조로 변형되어 실제로 산업에 응용할 수 있는 구조로 바뀌었으며, 그 예로 linear voltage differential transducer (LVDT), capacitive sensor 등의 비선형을 교정할 수 있게 되었고 그 정밀성은 피코미터( $10^{-12}$  m) 수준에 이르고 있다.[5]

본 연구는 광 간섭계와 결합된 엑스선 간섭계를 제작하여 기존의 광 간섭계가 안고 있던 광 간섭계의 비선형성 오차가 제거된 형태의 광/엑스선 복합 간섭계를 구현하였고, 이를 이용하여 capacitive sensor의 비선형성 오차를 측정하였다.

### 2. 광/엑스선 복합간섭계

#### 2.1 광/엑스선 복합간섭계의 개요

정밀길이 측정 및 교정에 많이 사용되고 있는 광 간섭계는 먼 거리(mm 이상) 측정에는 고

분해능으로 가능하나 나노미터 범위의 측정에는 그 정확도 면에서 제한을 받게 된다. 그 대표적인 측정 오차가 비선형성 오차이다. 광 간섭계는 길이 표준 원기에 직접적으로 소급이 되고, 광 간섭 신호의 각 주기의 길이는 매우 높은 정확도를 가지고 있으나 광 간섭신호 한 주기 내( $\lambda/2$ )의 위상 변위에 대한 길이는 비선형성이 존재하여 수 나노미터의 오차를 보이고 있다. 비선형성은 안정화된 Zeeman 레이저의 타원편광과 두 편광 성분의 비직교성, 그리고 광학계의 부정확한 정렬 등에 의한 주파수 혼합과 편광 혼합에 의해 나타난다. 이러한 광 간섭계의 비선형 오차는 transducer의 교정에 있어 오차의 요인이 되며, 광 간섭계의 한 주기 범위에서의 비선형 오차를 제거하기 위하여 엑스선 간섭계로 교정 대상물을 측정하게 된다면 광 간섭계의 비선형성 오차가 없는, 전체 교정 영역에서의 sub nanometer 이하의 감도를 가지는 측정이 될 것이다.

이러한 장점을 이용하여 광 간섭계와 엑스선 간섭계를 결합시킨 광/엑스선 복합 간섭계 형태의 장치를 구성하여 광 간섭계가 안고 있는 비선형성 오차를 엑스선 간섭계가 대신하여 측정할 수 있는 장치를 고안하여 나노미터 이하의 정확도를 얻을 수 있는 길이 측정 장치를 구성하였다.

## 2.2 엑스선 간섭계

엑스선 간섭계는 0.192 nm의 주기를 가지는 신호를 발생하며, 한 주기를 분할하면 피코미터의 분해능을 가지게 된다. 그림 2-1에 나타낸 엑스선 간섭계는 한국표준과학연구원서 자체 제작한 엑스선 간섭계이며, 실리콘 결정 덩어리로부터 Si(220) 결정면을 찾아 세 개의 얇은 결정판을 일정한 간격으로 평행하게 배치하도록 제작하였다. 엑스선 간섭계의 세 개의 결정판은 각각 분할기 결정(Splitter), 거울 결정(Mirror), 분석기 결정(Analyzer) 결정으로 불리며, 엑스선 빔의 분할, 반사 그리고 간섭시키는 역할을 한다. 엑스선 간섭신호를 검출하는 원리를 자세히 살펴보면, 엑스선이 분할기 결정에 입사하여 두 개의 빔으로 회절 분리되고 거울 결정을 통해 다시 하나의 엑스선 빔으로 모아지게 된다. 이때 분석기 결정면에 모인 엑스선은 서로 간섭 현상을 일으켜 정상파를 이루게 되는데, 간섭된 엑스선 빔의 간격은 약 0.2 nm 인 분석기 결정의 격자간격과 일치하게 된다. 분석기 결정을

천천히 이동시키면 분석기 결정의 격자와 엑스선 간섭 빔과의 상호 작용으로 인하여 주기적인 엑스선 신호가 발생하게 된다. 이 주기적인 신호는 분석기 결정의 격자간격인 0.2 nm와 일치하며 이 신호들의 개수를 세면 분석기 결정이 움직인 거리를 알 수 있다.

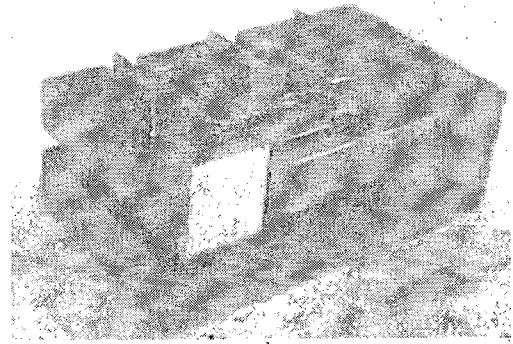


Fig. 2-1 Picture of x-ray interferometer

## 2.3 복합간섭계의 구성 및 측정 원리

그림 2-2는 광 간섭계와 엑스선 간섭계가 결합된 광/엑스선 복합간섭계를 나타낸다. 광 간섭계는 위상변조 광 간섭계를 구성하였으며, 엑스선 간섭계와 나노 이동대를 연결시켜 두 장치의 움직임을 읽을 수 있도록 구성하였다. 교정하고자 하는 대상물을 나노 이동대에 고정시키고 광 간섭계에 대하여 수직하게 정렬한다. 본 연구에서는 교정 대상물로서 capacitive sensor를 선택하여 나노 이동대에 설치하였다. 사용된 capacitive sensor는 분해능이 0.1 nm 인 정밀한 위치 센서이다. 이 위치센서의 비선형성을 광/엑스선 복합 간섭계를 사용하여 교정 하고자 한다.

광/엑스선 복합간섭계의 측정원리는 다음과 같다. 먼저 엑스선 간섭계의 분석기 결정을 이동시켜 calibration 시작 지점을 광 위상의 null point에 맞춘다. 교정 대상물이 올려진 나노 이동대를 이동시켜 교정하고자하는 지점까지 이동시킨 후, 즉 calibration point까지 이동 후 Phase locking을 시킨다. 이때 얻어진 광 위상은 null point가 아닌 임의의 위상을 얻게 될 것이다. 얻어진 위상은 null point로부터 어느 정도 떨어진 위치이므로 null point로부터 이 위치까지를 엑스선 간섭계의 분석기 결정을 움직여 광 위상의 null point까지 이동하면서 엑스선 간섭신호를 세게 되면 광 간섭계의 비선형성이

없는 측정이 이루어지게 된다. 엑스선 간섭계의 신호간 거리는 0.192 nm이므로 신호의 개수로 부터 엑스선 간섭계의 분석기 결정이 이동된 거리를 환산해 낼 수 있다.

## 2.4 복합간섭계 신호 검출

위에서 언급된 광/엑스선 간섭계를 구동하여 광 간섭신호와 엑스선 간섭신호를 검출하기 위한 구성도가 그림 2-2에 나타나 있다. 광 간섭계는 5 kHz로 위상을 변조시킨 위상변조 광 간섭계로 구성되어 있다. 변조된 레이저 빔은 beam splitter(BS)에 의해 두개의 빔으로 나뉘어 지는데 하나는 레이저 빔의 위상변화에 따른 오차를 검출하여 안정된 빔을 간섭계로 넣어주는 데 이용된다. Lock-in-Amp 1에서 받은 오차 값은 PID 제어를 통해 보상 값이 정해지고 위상변조기의 기준 신호(5 kHz)와 더해진 값이 증폭되어 위상변조기에 전달된다. 입사 레이저 빔의 feed back loop가 구성되면 측정에 필요한 빔에 섞여 있는 여러 가지 오차 요인들을 제거할 수 있다. 다음으로 나머지 다른 하나의 빔은 실제 측정에 사용되는 간섭계로 입사하게 된다. Polarizing beam splitter(PBS)에 의해 moving mirror와 fixed mirror로 전달되고 moving mirror의 위치변화에 따른 광 간섭신호는 Lock-In-Amp 2로 입력이 되어 측정 신호로 사용된다. 이렇게 받은 광 간섭신호는 A/D Converter를 거쳐 PC로 전달된다. PC에서는 나노 이동대에 Reference 위치 정보를 주어 위치 제어를 하게 되고 위치제어기에서는 Reference 위치와 Sensing 위치와의 거리를 제어하게 된다. 엑스선 간섭계의 분석기 결정은 PZT로 구동하게 하였고, PZT에 입력 전압 값의 변화를 주는 방식으로 했는데, 이때 PC에서 D/A Converter를 거쳐 출력되는 전압 값의 범위는 0~10V이므로 PZT를 구동 시킬 수 있는 전압 값(0~100V)으로 증폭하여 PZT로 인가하였다.

입사 빔과 간섭 빔의 신호를 측정하기 위해 Data Acquisition Board (DAQ)를 사용하여 데이터를 수집하였다. DAQ의 경우 아날로그 신호를 직접 A/D 변환기로 변환하여 신호 처리를 해줌으로써 데이터 전송 방법의 경우 보다 많은 샘플을 얻을 수 있다. 예를 들어 GPIB의 통신을 할 경우 1초당 2개의 샘플을 얻을 수 있지만 DAQ의 경우 1초당 20 이상의 샘플을 얻을 수 있으므로 보다 정밀한 측정이 가능할 수 있다.

엑스선 간섭계의 분석기 결정이 null point까지 이동할 때 검출되는 엑스선 간섭신호의 검출은 엑스선 검출기로 받아 rate meter로 읽어 들인 후, A/D 변환기를 통하여 PC로 전달된다.

광/엑스선 복합간섭계의 온도안정화 및 엑스선 radiation 차폐를 위해 챔버를 설계 제작 하였다. 챔버의 재질은 stainless steel 이며, 직경은 600 mm 이다. 챔버 내부는 온도 안정화를 위해 열선을 챔버 주위에 설치하였고, 엑스선 빔과 레이저 빔의 경로를 계산하여 챔버 외부에 flange를 설치하였다. 그림 2-3은 항온 챔버의 실제 사진이다.

## 3. 광/엑스선 복합간섭계의 응용

### 3.1 Capacitive sensor의 교정

광/엑스선 복합간섭계의 응용으로서 capacitive sensor의 비선형 오차를 측정하였다. 그림 2-2에 capacitive sensor의 비선형 오차를 측정하기 위한 구성도와 그림 2-3에 그 장치의 사진을 나타내었다. Cap. sensor는 flexure hinge 스테이지의 내부에 장착이 되어 있으며, 스테이지의 이동에 따른 변위는 광/엑스선 복합간섭계를 이용하여 측정하였다. 광/엑스선 복합간섭계의 신호 검출은 Ch. 2에 자세히 설명하였다. 그림 2-4는 광/엑스선 복합간섭계를 이용하여 측정한 cap. sensor의 비선형 오차를 나타낸다.

장치의 측정 불확도는 간섭계와 연결된 광 간섭신호의 오차 요인으로 작용되는 Abbe error와 광 간섭계에 영향을 미치는 열적 drift가 주요한 불확도 요인이다.

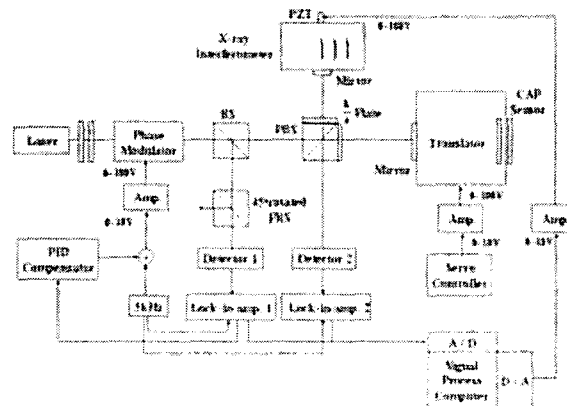


Fig. 2-2 Block diagram of measurement system

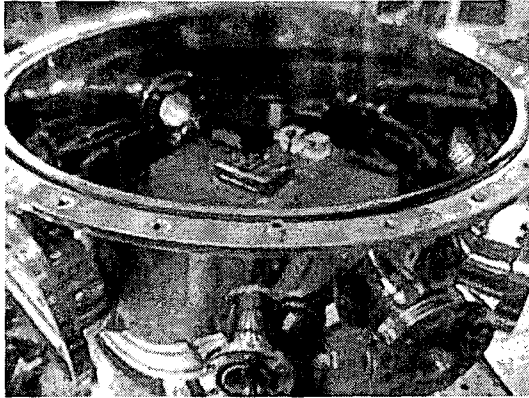


Fig. 2-3 Picture of the combined optical and x-ray interferometer

본 연구에서 제작된 광/엑스선 복합간섭계의 측정 불확도는 2.35 nm ( $k=2$ ) 로 평가되었다. 광/엑스선 복합간섭계 교정 장치를 구동시켰을 때 장치의 반복도가 전체 시스템의 불확도의 가장 큰 요인으로 작용하고 있으며, 이를 줄이기 위해서는 엑스선 간섭계의 mirror와 나노 이동대에 인가되는 진원 장치의 노이즈, 그리고 광 간섭계의 위상 안정을 위하여 챔버를 진공으로 만들어 공기 유동에 의한 위상의 변화를 최소화하는 방향으로 연구가 진행되고 있으며, 향후 서브나노의 반복도 측정이 가능하리라 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고정밀 측정 장치인 광/엑스선 복합간섭계를 구성하였으며, 실제 응용으로서 cap. sensor의 비선형 오차를 측정하였다. 광/엑스선 복합간섭계는 광 간섭계가 가지고 있는 비선형 오차를 제거하여 주고 고 분해능의 엑스선 간섭계를 이용하여 측정할 수 있는 장치로서 정밀 길이 측정에 많이 이용될 수 있는 장점을 가지고 있으며, 기존의 광 간섭계로만으로도 구성된 정밀 길이 측정 장치보다 높은 정확도의 정밀 길이 측정이 가능하게 되었다.

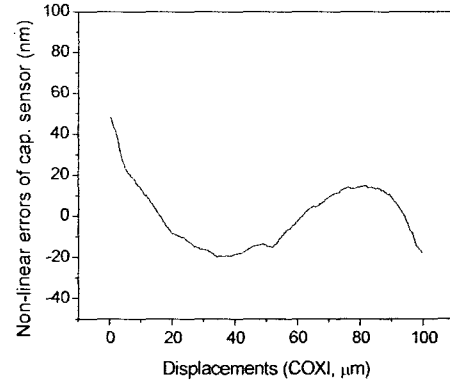


Fig. 2-4 Calibration result of cap. sensor using combined optical and x-ray interferometer

#### 참고문헌

1. U. Bonse and M. Hart, "An X-ray interferometer" Appl. Phys. Lett. 6, 155-156, 1965.
2. M Hart, "An Angstrom ruler", J. Phys. D : Appl. Phys. 1, 1405-8, 1968.
3. P. Becker, K Dorenwendt, G Ebeling, R Lauer, W Lucas, et al , "Absolute measurement of the (220) lattice plane spacing in a silicon crystal", Phys. Rev. Lett. 46, 1540-3, 1981.
4. G. Basile, A. Bergamin, G. Cavagnero, G. Mana, E. Vittone, G. Zosi, " Measurement of the silicon (220) lattice spacing", Phys. Rev. Lett. vol. 72, pp. 3133-3136, 1994.
5. G. Basile, P Becker, A Bergamin, G Cavagnero, A Franks, K Jackson, U Kuetgen, G Mana, E W Palmer, C J Robbie, M Stedman, J Stumpel, A Yacoot, and G Zosi, "Combined optical and X-ray interferometry for high-precision dimensional metrology", Proc. R. Soc. Lond. A 456, 701-729, 2000.