

레이저 간섭계를 이용한 선형 치수 측정 장치 Linear Dimension Measuring System using Laser Interferometers

*#김종안¹, 김재완¹, 강주식¹, 진종한¹, 엄태봉¹

*#J.-A. Kim(jakim@kriss.re.kr)¹, J. W. Kim¹, C.-S. Kang¹, J. Jin¹, T. B. Eom¹

¹ 한국표준과학연구원 기반표준부 길이시간센터

Key words : Linear dimension, laser interferometer, precision scale, step gauge

1. 서론

선형 치수 측정은 dimensional metrology 분야의 대표적인 측정으로 게이지 블록, 스텝 게이지와 같은 단면 표준물과 정밀 표준자와 같은 선 표준물 등이 주요한 기준물(standard artifacts)이 된다. 이러한 기준물의 측정을 위해 각 나라의 표준기관(National Metrology Institute)에서는 레이저 간섭계를 기반으로 한 측정 시스템을 갖추고 있다. 그러나 대부분의 선형 치수 측정 시스템은 한 종류의 측정물에 적용되기 때문에 여러 종류의 선형 치수 기준물의 측정을 위해서는 복수의 측정 시스템을 유지할 필요가 있다.^{1,2}

이러한 비효율성을 감소시키기 위하여 한국표준과학연구원에서는 여러 종류의 선형 치수 기준물을 측정할 수 있는 측정 시스템을 개발하여 사용하고 있다.³ 본 연구에서는 기존 측정 시스템의 성능 향상을 위해 새로운 선형 치수 측정 장치를 개발하고자 한다. 새로운 측정 시스템은 기존 시스템에 비해 회전 운동 오차 실시간 보상, CCD 카메라 분해능 향상, 그리고 고성능 제어기 등을 이용하여 Table 1 과 같은 목표 사양을 달성하고자 한다.

Table 1 Target specification of linear dimension measuring system (L은 측정 길이)

항목	목표 사양
측정 범위	2 m
확장 불확도 (k=2)	$\sqrt{(100 \text{ nm})^2 + (0.50 \times 10^{-6} \times L)^2}$ (단면 표준물) $\sqrt{(40 \text{ nm})^2 + (0.30 \times 10^{-6} \times L)^2}$ (선 표준물)

본 연구에서 개발된 선형 측정 시스템은 Fig. 1 과 같이 스테이지, 변위 측정 센서, 제어기 및 환경 인자 측정부로 구성된다. 다음 장에서 부터는 측정 시스템의 각 부분에 대한 설계와 제작에 대하여 설명한다.

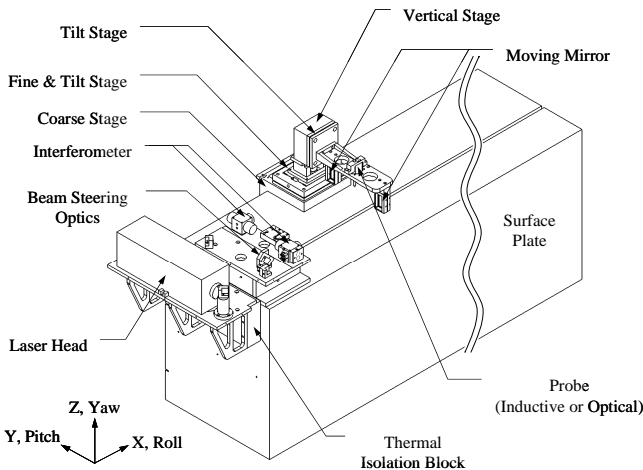


Fig. 1 Linear dimension measuring system using laser interferometers

2. 스테이지 부

스테이지 부는 전체 측정 범위 이동을 위한 조동 스테이지, 제한된 이동 범위에서 높은 위치 분해능을 얻기 위한 미동 스테이지, 스테이지의 회전 운동 오차를 보상하기 위한 회전 스테이지, 그리고 프로브의 수직 방향 위치 조절을 위한 수직 스테이지로 구성된다 (Fig. 2).

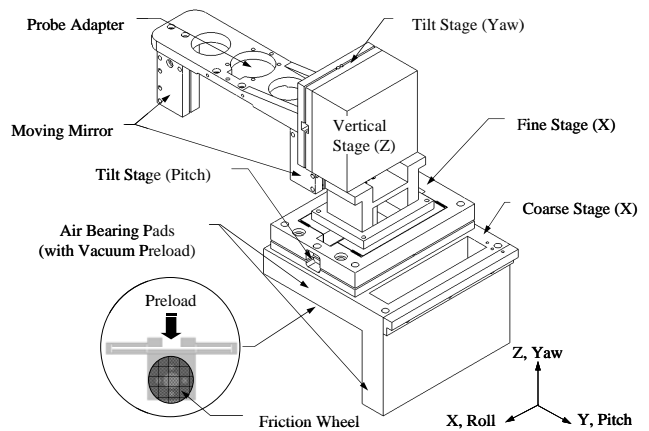


Fig. 2 Stage system consisting of air bearing pads for coarse stage (X), fine stage (X), vertical stage (Z), and rotational stages (Pitch and Yaw)

조동 스테이지는 길이가 2.4 m 인 석정반의 윗면과 옆면을 안내면으로 이용한다. 조동 스테이지 이송부의 밀면과 옆면에는 진공과 공압을 이용한 공압 베어링 패드가 구성되어 있어 이송부가 안내면에서 분리되지 않고 이동될 수 있도록 제작하였다. 밀면 공압 베어링 패드의 중앙 부에는 DC 모터와 마찰 바퀴로 구성된 구동부가 장착되어 조동 스테이지의 이송부를 구동시킨다 (최대 구동 속도: 32 mm/s).

조동 스테이지 이송부에 고정된 미동 스테이지는 압전 소자와 탄성 힌지 구조를 결합하여 제작하였다. Pitch 방향 회전 오차를 보상하기 위한 회전 스테이지는 미동 스테이지 탄성 힌지 구조물에 함께 제작되었다. 미동 스테이지 위에는 프로브의 수직 방향 위치 조절을 위한 수직 스테이지가 고정된다. 수직 스테이지는 구름마찰 베어링을 사용한 상용 스테이지와 DC 모터를 이용하여 제작하였고 포텐셔미터를 위치 센서로 이용한다. 수직 스테이지의 이동 부에는 압전 소자와 탄성 힌지 구조를 이용하여 제작된 Yaw 방향 회전 스테이지가 고정된다. 최종적으로 Yaw 방향 회전 스테이지 끝단에는 프로브와 레이저 간섭계의 반사경이 부착되는 고정판이 연결된다.

3. 변위 측정 센서

선형 치수 측정 시스템의 변위 측정 센서로는 측정물의 기준 위치 감지를 위한 프로브와 스테이지의 직선 및 회전 변위 측정을 위한 레이저 간섭계가 사용된다. 측정물의 종류에 따라 서로 다른 종류의 프로브가 적용된다. 스텝 게이지나 엔드 바와 같은 측정물의 기준면을 감지 하기 위해서는 LVDT 방식의 접촉 프로브가 사용되고, 정밀 표준자

와 같은 선 표준물의 측정을 위해서는 광학 현미경 방식의 프로브를 적용한다.

레이저 간섭계 시스템은 Fig. 3 과 같이 레이저 정렬부와 3 축 레이저 간섭계로 구성된다. 레이저 정렬부에서는 레이저 빔을 3 개로 분리하여 각 레이저 간섭계로 입사되도록 각 레이저 빔의 위치와 방향을 조절한다. 레이저 간섭계로는 상용 간섭계 (10706B, Agilent 社)를 사용하였는데 3 축 변위 (X, Pitch, Yaw)를 측정하기 위해 1 축 간섭계와 1 축 레이저 간섭계를 개조한 2 축 레이저 간섭계를 설치하였다. 레이저 간섭계에서 발생하는 간섭 신호는 광섬유를 이용하여 외부에 장착된 감지기로 전달된다.

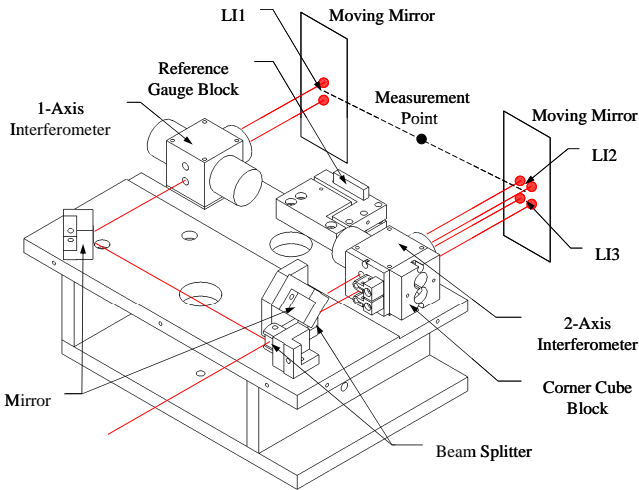


Fig. 3 Configuration of laser interferometer part of the linear dimension measuring system

레이저 간섭계의 이동 반사경은 스테이지 이동부 끝단에 고정되고, 각 레이저 간섭계의 배치는 아베 오차가 최소화 되도록 결정되었다 (Fig. 3). 따라서 프로브의 측정 위치가 각 레이저 간섭계 측정 위치의 중간과 일치되도록 정렬된다. 각 레이저 간섭계의 변위 측정값 (LI1, LI2, LI3)을 이용하여 직선 및 회전 변위를 계산할 수 있다.

4. 제어기 및 환경 인자 측정부

선형 치수 측정 시스템의 제어부 구성은 사용자 인터페이스를 위한 산업용 PC 와 정주기 제어 루프를 수행하기 위한 PXI 제어기 부분으로 이루어 진다 (Fig. 4).

산업용 PC 는 사용자 인터페이스 외에 빠른 속도나 정주기 특성이 요구되지 않는 센서와의 인터페이스를 담당하고, PXI 제어기에 장착될 수 없는 인터페이스 보드도 장착된다. Thermistor 와 thermometer 를 이용하여 공기 중과 시편의 온도를 측정하고 환경 센서 (PTU200, Vaisala 社)를 이용하여 공기 중의 습도와 압력 변화를 측정한다. 레이저 간섭계 신호 처리 보드 (N1231B, Agilent 社)는 PC 의 PCI 슬롯에 장착되며, 신호 처리 보드 상에 있는 32 비트 디지털 위치 신호 출력 포트를 통하여 PXI 컨트롤러에 위치 신호를 전달한다.

PXI 컨트롤러 (NI PXI-8176, NI 社)는 빠른 계산 속도와 정주기 특성이 요구되는 신호 처리와 제어 루프를 담당한다. 이러한 작업을 수행하기 위해 PXI 컨트롤러와 함께 장착된 FPGA (Field-Programmable Gate Array) 다기능 신호처리 보드 (NI PXI-7831R, NI 社)를 사용한다. 이 보드는 처리된 센서 신호를 PXI 컨트롤러에 전달하고 이를 이용하여 PXI 컨트롤러에서 계산된 구동기 신호를 각각의 구동기에 입력하는 역할을 수행한다. FPGA 신호처리 보드의 디지털 입력 포트 (DIO)를 통하여 간섭계 신호 처리 보드의 위치 신호,

리미트 스위치, 측정 장치를 조정하는 조이 스틱의 디지털 조작 신호를 읽는다. 아나로그 입력 포트 (ADC)에서는 조이 스틱의 아나로그 조작 신호, 수직 방향 스테이지 위치 측정을 위한 포텐서미터 신호, LVDT 프로브 신호를 각각 읽는다. 아나로그 출력 포트 (DAC)에서는 구동부에 사용된 DC 모터와 압전 소자를 제어하기 위한 신호를 각각의 증폭기에 전달한다.

산업용 PC 와 PXI 제어기 간의 데이터 교환은 TCP/IP 통신을 이용하여 이루어지며 사용자가 요구하는 여러 가지 동작 조건에 따라 필요한 제어 인자값과 동작 완료 여부 등이 서로 교환된다.

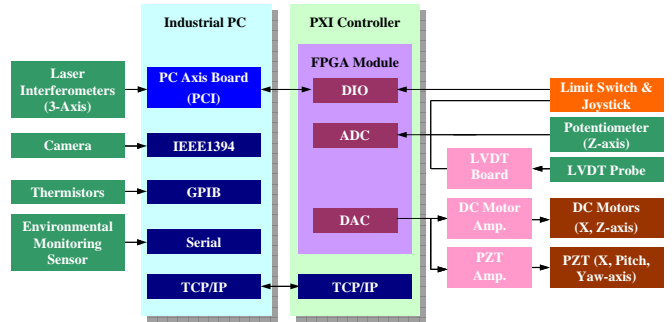


Fig. 4 Configuration of the controller of the linear dimension measuring system

이와 같이 구성된 선형 치수 측정 시스템의 구동을 위해 LabVIEW®를 이용하여 FPGA 신호처리 보드에서 동작하는 프로그램, PXI 제어기를 위한 real-time 모듈 프로그램, 사용자 인터페이스를 위한 호스트 프로그램을 작성하였다. 이러한 프로그램을 이용하여 사용자가 측정물 설치한 후 자동으로 측정 작업을 수행할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 스텝 게이지, 정밀 표준자와 같은 선형 치수 기준물 측정을 위한 선형 치수 측정 시스템의 설계와 제작을 수행하였다. 제작된 선형 치수 측정 시스템에서는 3 축 레이저 간섭계를 이용하여 직선 변위와 2 축 회전 변위를 측정할 수 있다. 회전 오차를 실시간으로 보상하여 아베 오차를 최소화 할 수 있다. 전체 측정 과정이 자동화 되어 있어 측정물의 장착 후에는 최종적인 측정 값을 작업자의 조작 없이 얻을 수 있다. 향후 온도 제어 챔버가 완성된 후 성능 테스트를 수행할 예정이다.

후기

본 연구는 한국표준과학연구원 “길이시간 측정 표준 확립 및 교정 측정 능력 선진화” 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Darnedde, H., "High-precision Calibration of Long Gauge Blocks using the Vacuum Wavelength Comparator," *Metrologia*, **30**, 349-359, 1992.
2. Flügge, J., Dangschat, H., Spies, A., Tschirmich, J., and Pieleles, H., "Concept of an Interferometric Length Comparator with Measurement Uncertainties in the Nanometer Range," *EUSPEN*, **2**, 27-30, 1999.
3. Eom, T., and Han, J., "A Precision Length Measuring System for a Variety of Linear Artefacts," *Meas. Sci. Tech.*, **12**, 698-701, 2001.