

변위 각도 동시 측정용 복합 레이저 간섭계의 제작과 특성 분석

김재완*(한국표준과학연구원), 김종안(한국표준과학연구원), 강주식(한국표준과학연구원),
엄태봉(한국표준과학연구원)

Development and performance test of a complex laser interferometer for simultaneously
measuring displacement and 2-D angles

J. W. Kim (Lenth group, KRISS), J. A. Kim (Lenth group, KRISS), C. S. Kang (Lenth group, KRISS), and
T. B. Eom (Lenth group, KRISS)

ABSTRACT

A compact linear and angular displacement measurement device was developed by combining a Michelson interferometer and an autocollimator to characterize the movement of a precision stage. A Michelson interferometer and an autocollimator are typical devices for measuring linear and angular displacement, respectively. By controlling the polarization of reflected beam from the target mirror of the interferometer, some part of light was retro-reflected to the light source and the reflected beam was used for angle measurement. The interferometer and the autocollimator use the same optic axis and the target mirror can be easily and precisely aligned orthogonal to the optic axis by monitoring the autocollimator's signal. The autocollimator was designed for angular resolution of 0.1 arcsec and dynamic range of 60 arcsec. The nonlinearity error of interferometer was minimized by trimming the gain and offset of the photodiode signals. Through the experiments, we evaluate the performance of measurement device and discuss its applications.

Key Words : Laser (레이저), Interferometer (간섭계), Autocollimator (자동시준기), Distance (거리), Angle (각도), Stage(스테이지)

1. 서론

정밀 이송대의 운동특성을 측정하기 위해서 레이저 간섭계와 자동 시준기를 결합한 복합 레이저 간섭계를 제작하였다. 계측기나 가공기에 사용되는 이송대는 설계된 이송축을 따라 1 차원 운동을 하는 것이 가장 이상적이다. 그러나 엄밀한 의미에서 모든 이송대는 변위와 회전운동이 섞여 있는 6 자유도 운동을 하게 된다.¹ 선형운동을 하도록 설계된 이송대가 pitch, yaw, rolling과 같은 회전운동을 하면 이송대를 이용한 위치 결정 능력이 저하된다.² 이송대의 동적특성은 이를 사용하는 계측기나 가공기의 성능의 한계를 결정하는 중요한 요소이므로 변위와 각도 6자유도를 측정하는 것이 필요하다.

레이저 간섭계와 자동시준기는 각각 변위와 각

도를 정밀하게 측정하는 대표적인 방법이다. 정밀 이송대의 운동 특성을 알기 위해서는 변위와 각도가 동시에 측정돼야 하므로 두 가지 측정 장비를 모두 이용할 필요가 있다. 상용의 레이저 간섭계나 자동시준기를 이용하는 경우에는, 두 장비를 동기시키는 것이 어렵다는 점과 이송대의 서로 다른 지점의 변위와 각도를 측정한다는 점이 측정의 속도와 정확도에 제한을 준다.

이를 극복하기 위해 새로 고안한 복합 레이저 간섭계는 이송대에서 반사된 빛의 편광을 조절하여 일부는 레이저 간섭계에서 사용하고 일부는 자동시준기가 사용할 수 있도록 제작하였다.

2. 복합 레이저 간섭계의 원리

2.1 마이켈슨 간섭계의 원리

우리나라뿐만 아니라 세계적으로 통용되는 길이의 국제단위인 meter (m)는 빛이 진공을 일정한 시간 동안 진행한 거리로 정의하고 있다. 1960년 까지만 해도 국제미터원기(International prototype meter)에 표시된 눈금을 기준으로 미터를 정의했다. 그러나 1892년 마이켈슨이 간섭계를 이용하여 거리를 측정할 이래로 레이저와 결합된 간섭계는 국제미터원기의 정확도 (약 1 μm) 보다 더 정확히 측정이 가능하다. 그러므로 현재는 미터원기를 사용하지 않고 빛의 속도로 길이를 정의하고 있다. 이처럼 마이켈슨 레이저 간섭계는 길이의 정의를 직접적으로 구현하는 수단이고, 정확하므로 정밀 측정에 널리 사용되고 있다.

Fig 1은 대표적인 마이켈슨 레이저 간섭계를 나타낸다. 주파수가 안정된 레이저에서 나온 빛은 편광분할기(polarizing beam-splitter, PB)를 통과하여 편광 성분에 따라 고정된 기준거울과 이동하는 거울로(stage & mirror) 나뉘어 입사된다. 거울에서 반사되고 사분의 일 파장판(λ/4 wave plate)를 두 번 통한 빛은 편광방향이 90도 바뀌므로 다시 편광 분할기를 통과할 때는 그림과 같이 입사될 때와는 다른 방향으로 나가게 된다. 두 거울에서 반사된 빛은 서로 다른 광 경로를 지나므로 각각의 광경로 차이는 간섭신호의 위상차이로 나타나다. 그러므로 간섭신호로부터 거울의 상대적인 움직임을 측정할 수 있다.

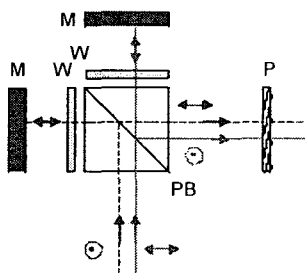


Fig. 1 Principle of Michelson interferometer. M: mirror, W: quarter wave plate, PB: Polarizing beam splitter, and P: polarizer.

2.2 자동시준기의 원리

자동시준기는 작은 각도 변화를 정밀하게 측정할 수 있으므로 이송대의 pitch와 yaw 운동을 측정

할 때 많이 사용된다. 일반적인 자동시준기는 Fig 2와 같은 구조를 가지고 있다. 집광원에서 나온 빛은 시준렌즈(collimating lens)를 통해 평행광이 되어 측정 거울에 입사된다. 거울에서 반사된 평행광은 시준렌즈로 다시 집속되고 선속 분할기(beam splitter)에서 반사되어 위치 감지 센서에 입사된다. 거울의 각도가 변하면 반사된 빛의 위치가 변하므로 위치 감지 센서로 빛의 위치를 측정하면 회전각 Δθ는 렌즈의 초점거리 f와 변위 Δr로 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$\Delta\theta = \frac{\Delta r}{2f}$$

각도 측정의 감도를 높이기 위해서는 렌즈의 초점거리가 길거나 위치 감지 센서의 분해능이 높아야 한다. 렌즈의 초점거리가 길면 자동시준기의 크기가 커지고 수차에 의해 분해능이 떨어질 수도 있으므로 각도 분해능을 높이기 위해서는 위치감지 센서의 분해능을 향상시키는 것이 필요하다. pitch와 yaw를 동시에 측정하기 위해서는 2차원 위치 감지 센서를 사용한다.

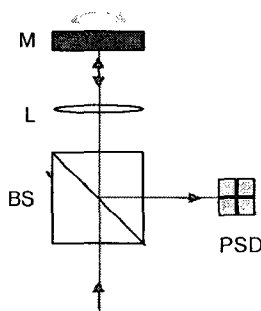


Fig. 2 Principle of an autocollimator. M: mirror, L: Lens, BS: Beam splitter, and PSD: Position sensitive detector.

2.3 복합 레이저 간섭계의 원리

복합레이저 간섭계는 거리 측정기인 간섭계와 각도 측정기인 자동 시준기를 결합하여 거리와 각도를 동시에 측정하기 위한 장치이다. 두 측정방법을 결합하기 위해서는 동일한 거울에서 반사된 빛을 간섭계와 자동시준기가 공유해서 사용해야 한다. 그러나 일반적인 간섭계는 측정 거울에서 반사된 빛이 광원 쪽으로 되돌아 나오지 않게 구성하므로 (Fig. 1) 기존의 형태에서 변형이 필요하다. 본 논문에서는 Fig. 3과 같이 간섭계에 사용하는 사분의 일 파장판을 선편광기로 바꿔서 측정거울에서 반사된 빛의 일부는 간섭계가 사용하고 일부는 편광분할기

를 통과해 자동 시준기가 사용할 수 있도록 만들었다. 기존의 간섭계에서 사용하던 사분할 파장판은 거울에서 반사된 빛의 편광 방향을 수직하게 돌려주는 역할을 한다. 선편광기는 입사광의 편광 방향에 대해 45° 기울어지게 놓으면 입사광과 같은 방향과 수직한 편광 성분이 모두 만들어진다. 그러므로 처음의 편광 방향과 수직한 성분은 사분할 파장판을 사용했을 때와 동일하게 편광분할기에서 반사되고 다른 거울에서 반사된 빛과 간섭신호를 만들게 된다. 처음의 편광 방향과 평행한 편광 성분은 편광분할기를 통과해 자동시준기의 위치 감지 센서로 입사되고 거울의 기울어진 각도를 측정하게 된다.

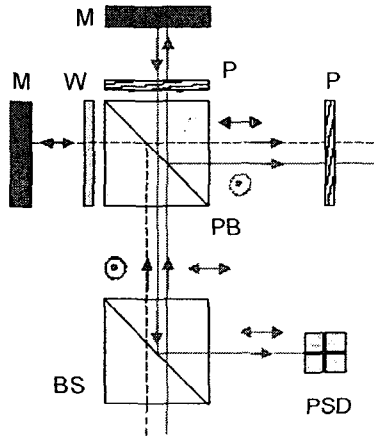


Fig. 3 Principle of the complex interferometer combined with the Michelson interferometer and an autocollimator. M: mirror, W: quarter wave plate, PB: Polarizing beam splitter, P: polarizer, BS: beam splitter, and PSD: position sensitive detector.

일반적으로 거리 측정에 사용되는 마이켈슨 간섭계는 거울이나 코너큐브 등을 이용해 다양한 형태로 만들 수 있다. 여러 간섭계 중에서 이송대에 코너큐브를 부착하는 형태는 본 논문에서 제한한 복합 레이저 간섭계를 구성할 수 없다. 거울과 사분할 파장판을 사용하는 레이저 간섭계는 대부분 사분할 파장판의 일부를 편광기로 바꿔서 자동시준기와 결합할 수 있다.

3. 복합 레이저 간섭계의 제작과 특성

레이저 간섭계의 사용을 편리하게 하기 위해 레이저 빛을 광섬유를 이용하여 전송하도록 설계하였다. 실험 장치와 복합 레이저 간섭계의 구조는 Fig.

4와 같다. 파장이 안정된 He-Ne 레이저(Melles Griot Stabilized He-Ne laser)를 광원으로 사용하였고 단일 모드 편광유지 광섬유를 사용하여 복합 레이저 간섭계로 빔을 전송하였다. 먼 이송 거리까지 측정이 가능하도록 하기 위해 간섭계의 형태는 레이저 빔이 코너큐브를 거쳐 이송대의 거울에 입사되는 구조를 채택하였다. 광섬유는 코어의 직경이 4.2 μm이므로 점광원과 같이 취급이 가능하다. 구면파로 진행하는 빛은 빛살 가르개 (beam splitter)를 지나고 초점거리가 19 mm인 렌즈를 통과하면서 평행광으로 만들어진다. 시준렌즈의 수차는 자동시준기의 성능을 저하하는 요인이므로 수차가 작은 이중렌즈(doublet)를 사용하였다. 렌즈의 초점거리는 빔의 크기와 자동시준기의 분해능을 고려하여 선택하였다. 사분할 포토다이오드에서 빔의 크기를 조절하여 분해능은 0.1 arcsec이고 측정 영역은 약 60 arcsec로 설정하였다. 이송대에 부착된 거울에서 반사된 빛은 빛살가르개에서 반사되고 사분할 포토다이오드(quadrant photo diode)로 반사광의 위치를 측정한다.

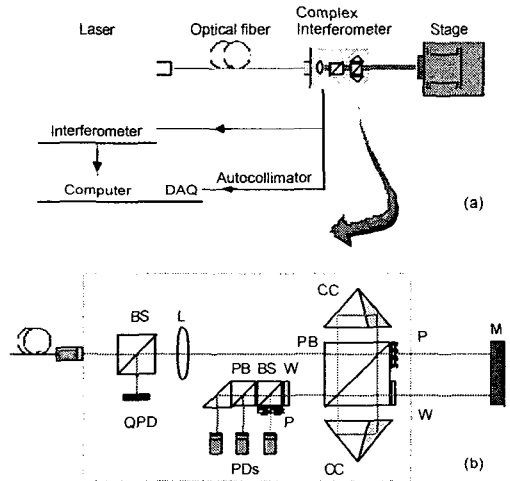


Fig. 4 (a) Experimental setup for testing the performance of a complex laser interferometer and (b) the configuration of a complex laser interferometer. BS: beam splitter, L: collimating lens, QPD: quadrant photo diode, PDs: Photo diodes, PB: Polarizing beam splitter, W: quarter wave plate, P: polarizer, CC: corner cube, and M: mirror.

자동시준기의 사분할 포토다이오드의 신호는 저잡음 앰프를 이용해 전압신호로 변환된 후 컴퓨터에 부착된 data acquisition (DAQ) board를 통해 읽고 각도로 변환 처리된다.

간접계의 수광부에서는 사분할 파장판과 편광분할기를 이용하여 서로의 위상이 90° 씩 차이 나는 3개의 빛을 만들어 거울의 이동 거리와 이동 방향을 측정한다.

레이저 간섭계로 거리를 측정할 때는 편광 섞임 등과 같은 이유로 주기적인 오차가 발생한다.³ 이런 비선형 오차는 간접계의 성능을 제한하는 요소로 최소화할 필요가 있다. 여기서는 신호의 오프셋과 이득을 조절하여 간섭신호의 비선형 효과를 최소화할 수 있도록 자체 개발한 전자회로를 이용해 간섭신호를 처리한다.⁴ 처리된 신호는 시리얼 통신으로 컴퓨터에 저장된다.

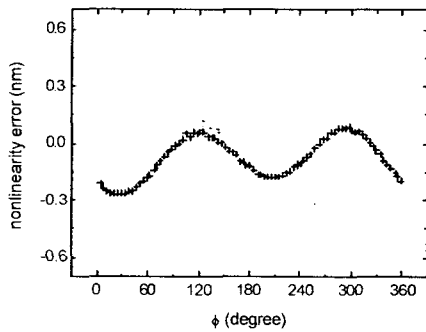


Fig. 5 Nonlinear error of the laser interferometer. The error was displayed in phase space.

간접계의 성능을 파악하기 위해 비선형 오차를 측정하였다. 간접계에서 만들어진 sin과 cos신호를 컴퓨터로 직접 읽고 곡선맞춤을 통해 위상을 구한 값을 기준으로 신호처리 회로의 출력값과의 차이를 표시한 것이 Fig. 5와 같다. 비선형 오차는 주기적으로 반복되는 성질이 있으므로 위상공간에서 그 값을 표시하였다. 오차의 최대 약 0.3 nm 벗어나고 있다.

4. 결론

정밀 이송대를 평가하기 위해 변위와 각도를 동시에 측정할 수 있는 복합 레이저 간섭계를 만들었다. 레이저 간섭계와 자동 시준기 각각의 장점을 가지도록 효과적으로 결합하는 방법을 제시하였다. 제작된 복합간섭계의 각도 분해능은 0.1"이고 거리 측정의 비선형 오차는 0.3 nm 이내이다.

후 기

이 연구는 산업자원부의 평면길이 측정기술 표준화 과제'의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

1. Hicks T., and Atherton, P., "The nanoPositioning book," Queensgate Instruments Ltd. pp. 92 - 97 1997.
2. Salapaka, S., Sebastian, A., Cleveland, J., and Salapaka, M., "High bandwidth nano-positioner: A robust control approach," Rev. Sci. Instrum., Vol. 73, pp. 3232 - 3241, 2002.
3. Heydemann, P., "Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers," Appl. Opt. Vol. 20, pp. 3382-3384 1981.
4. Eom, T., Kim, J., and Jeong, K., "The dynamic compensation of nonlinearity in a homodyne laser interferometer," Meas. Sci and Tech, Vol. 12, pp. 1-5 2001.