

게이지 블록의 열팽창계수 측정을 위한 정밀 간섭계 기반

High precision laser interferometer for measuring coefficient of linear thermal expansion of gauge blocks

*#강주식¹, 김재완¹, 김종안¹, 엄태봉¹

*C.-S. Kang(cskang@kriss.re.kr)¹, J.W. Kim¹, J.-A. Kim¹, and T.B. Eom¹

¹ 한국표준과학연구원 기반기준본부 길이시간센터

Key words: laser interferometer, gauge block, thermal expansion

1. 서론

게이지 블록 (gauge block)은 길이의 단면기준물 (end standards)로서, 가장 널리 사용되는 길이 기준물이다.¹ 게이지 블록은 다양한 길이 측정기를 교정하거나 길이 기준물의 교정 (calibration)에 기준물로 사용되는데, 기준물의 길이는 온도에 따라 달라지므로, 길이분야에서는 20 °C에서의 길이를 기준으로 삼고 있다. 따라서 정밀 측정을 위해서는 측정실의 온도가 기준온도인 20 °C로 유지하는 것이 중요하며, 만일 기준온도로부터 벗어났다면 측정 대상물의 온도를 정확히 측정하여 열팽창효과를 보정하여야 한다. 온도가 20 °C에서 벗어난 편차를 Δt 라고 하면, 열팽창에 대한 보정은 식 (1)과 같다.

$$\Delta l = \alpha \Delta t \times l \quad (1)$$

여기서 α 는 열팽창계수인데, 정밀측정에서는 이 열팽창계수의 값을 정확히 알아야 측정불확도가 작아지게 된다. 게이지 블록의 열팽창계수를 정확히 측정하기 위한 장치에 대한 연구가 세계적으로 꾸준히 진행되어왔다.^{2,6} 본 논문에서는 게이지 블록의 열팽창계수를 측정하기 위한 장치의 일부로 개발한 고정밀 레이저 간섭계에 대해 기술하고자 한다.

2. 고정밀 레이저 간섭계

게이지 블록의 열팽창계수를 측정하기 위해 개발한 레이저 간섭계의 구조도는 Fig. 1과 같다.

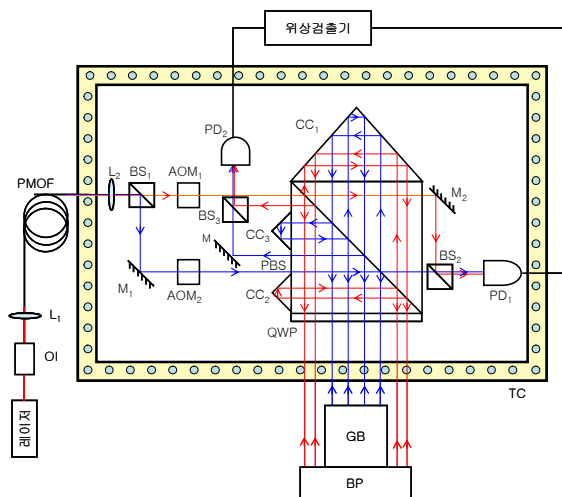


Fig. 1 Schematic diagram of the high precision interferometer. PMOF: polarization maintaining optical fiber; OI: optical isolator; L1, L2: lens; BS1, BS2, BS3: beam splitter, AOM1, AOM2: acousto-optic modulator, PBS: polarizing beam splitter, PD1, PD2: photo detector, M1, M2, M3: mirror, CC1, CC2, CC3: cube-corner prism, QWP: quarter waveplate, GB: gauge block, BP: base plate; TC: thermal chamber.

이 간섭계는 헤테로다인 간섭계로서, 차동 (differential) 간섭계

의 구조를 가진다. 즉, 기준판에 대한 게이지 블록의 길이 변화를 헤테로다인 방식으로 측정한다. 주파수 안정화 호모다인 He-Ne 레이저 (Melles Griot, 05-STP-903)가 광원으로 사용되며, 레이저에서 나온 빛은 광단절기를 지나 편광 유지 광섬유를 통해 간섭계로 입사된다. 광학 간섭계는 진공챔버 내에 위치하며, 편광분할기와 1/4파장판, 그리고 세 개의 코너큐브 프리즘으로 구성된다. 편광 유지 광섬유는 간섭계에서 p-편광과 s-편광 성분이 모두 발생하도록 각도를 조절하여 사용하며, 출력된 빛은 렌즈에 의해 평행광으로 만들어진 후, 광분할기로 나뉘어 각각 음향광학변조기를 지나면서 주파수가 변조되게 된다.

음향광학변조기 AOM1과 AOM2는 변조 주파수가 10 kHz 차이 나게 하였으며, 1차 회절광을 측정에 사용한다. 간섭계의 벽은 구리판으로 되어 있으며, 이 구리판 안으로 온도가 20 °C로 안정화된 냉각수가 순환함으로써 간섭계 내부의 온도가 일정하게 유지 되도록 하였다.

빛의 상세한 경로는 다음과 같다.

가. 음향광학변조기 AOM1에서 나오는 빛:

- 1) p-편광: AOM1 → PBS → M2 → BS2 → PD1
- 2) s-편광: AOM1 → PBS → QWP → BP(b1) → QWP → PBS → CC1 → PBS → QWP → BP(b2) → QWP → PBS → CC2 → PBS → QWP → BP(b3) → QWP → PBS → CC1 → PBS → QWP → BP(b4) → QWP → PBS → BS3 → PD2

나. 음향광학변조기 AOM2에서 나오는 빛:

- 1) p-편광: AOM2 → PBS → BS2 → PD1
- 2) s-편광: AOM2 → PBS → QWP → GB(g1) → QWP → PBS → CC1 → PBS → QWP → GB(g2) → QWP → PBS → CC3 → PBS → QWP → GB(g3) → QWP → PBS → CC1 → PBS → QWP → GB(g4) → QWP → PBS → M3 → BS3 → PD2.

여기서 b_i와 g_i (i=1,2,3,4)는 각각 기준판 (BP) 위의 점과 게이지 블록 (GB) 위에서 빛이 반사하는 지점을 나타내며, 그 위치는 Fig. 2(b)와 같다.

AOM1에서 나온 빛의 s-편광 성분은, 게이지 블록 면에서 4회 반사한 후 검출기로 입사하며, AOM2에서 나온 빛의 s-편광 성분은, 기준판에서 4회 반사한 후 검출기로 향하게 된다. 즉, 이 간섭계는 4-pass 간섭계인 것이다. 소형 코너큐브 프리즘 2개를 설치함으로써 기존 간섭계의 분해능이 2배로 향상되었다.

Fig. 4 (a)는 이들 코너큐브 프리즘의 위치를 보여주며, 레이저 빔의 위치를 함께 도시하고 있다. 그림에서 ⊙와 ⊗는 각각 지면을 통해 빛이 나오고 들어감을 표시한다. Fig. 4 (b)는 게이지 블록면과 기준판에서의 빛의 반사 위치를 보여준다.

광검출기 PD1과 PD2에서 얻어지는 맥놀이 신호는 로크인 앰프 (lock-in amplifier)에 기준신호와 측정신호로 각각 사용된다. 로크인 앰프의 위상 측정 분해능이 0.01° 이므로, 광학 간섭계의 전기

적인 분해능은 2 pm 가 된다. 실제적인 측정 분해능은 이 전기적 분해능과 간섭계의 장기 안정도, 그리고 비선형성 등에 의해 결정되게 된다.

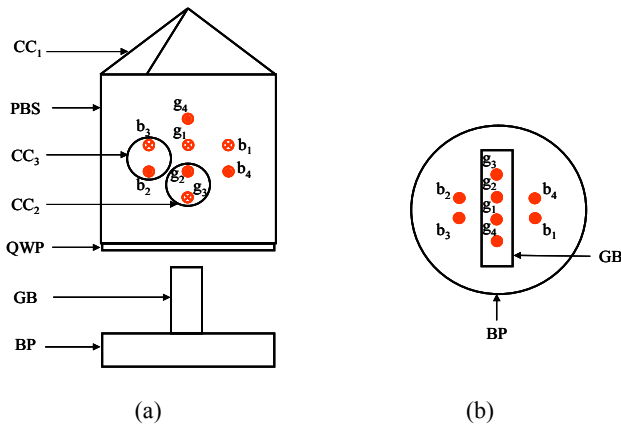


Fig. 2 Locations of cube-corner prisms and beams.

- (a) Positions of two small cube-corner prisms and laser beams seen from the left side of Fig. 1.
 - (b) Positions of the beams on the platen and the gauge block.
- PBS: polarizing beam splitter, CC₁, CC₂, CC₃:cube-corner prism, QWP: quarter waveplate, GB: gauge block, BP: base plate.

코너큐브의 앞면은 무반사 코팅되었으며, 뒷면은 금속코팅하여 반사할 때 편광 변화가 최소화 되도록 하였다. 제작한 간섭계의 실물 사진은 Fig. 3과 같다.

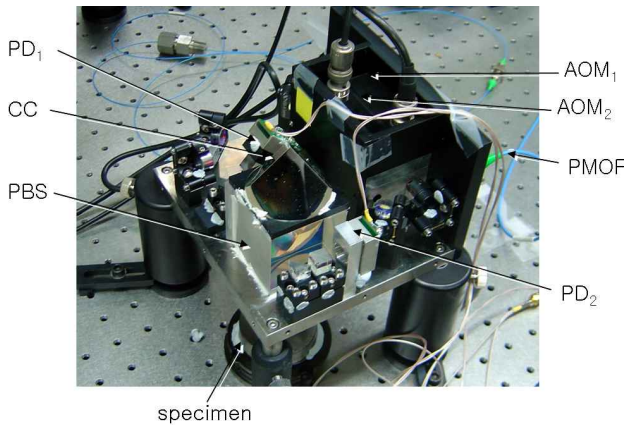


Fig. 3 Photograph of the optical interferometer. PD₁, PD₂: photo detectors, PBS: polarizing beam splitter, AOM₁, AOM₂: acousto-optic modulators, PMOF: polarization maintaining optical fiber.

일반적으로 게이지 블록을 측정하기 위해서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 게이지 블록을 기준판에 밀착시킨 후 간섭계의 샘플 스테이지에 놓고 측정하나, 간섭계를 정렬할 때에는 게이지 블록의 형상으로 인한 영향을 배제하기 위하여 게이지 블록을 밀착하지 않고 기준판만을 샘플 스테이지 위에 놓고 실시하였다.

간섭계의 안정도 검사를 할 때에도 기준판만 놓고 실시하였는데, 안정도는 간섭계를 진공챔버에 넣고 온도 안정화 시킨 상태에서 측정하였다. 4시간이 조금 넘는 시간 동안 측정한 결과, 간섭계의 길이측정값의 변화는 Fig. 4와 같았으며, 이로부터 간섭계의 안정도가 ±1 nm 정도임을 확인할 수 있었다.

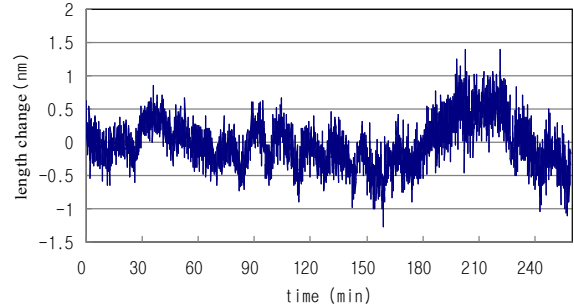


Fig. 4 Stability of the interferometer.

3. 결론 및 논의

게이지 블록의 열팽창계수를 정밀 측정하기 위한 헤테로다인 레이저 간섭계를 개발하였다. 1개의 큰 코너큐브 프리즘과 2개의 소형 코너큐브 프리즘을 사용하는 구조로 설계함으로써 4-pass 간섭계를 구현하였고, 이로 인해 측정 분해능을 기존의 간섭계보다 2배로 향상시킬 수 있었다. 간섭계는 진공챔버 내부에 위치하며, 음향광학변조기와 로크인 앰프를 이용한 헤테로다인 측정법을 사용한다. 본 간섭계는 게이지 블록의 열팽창계수 측정 시스템에 사용될 예정이며, 이 간섭계의 안정도를 진공상태에서 4시간 동안 측정한 결과, 길이변화량이 ±1 nm 이내임을 확인하였다. 추후 로크인 앰프로부터 측정되는 phasor의 x축 성분과 y축 성분 데이터에 타원적분법을 적용하여 비선형성 효과를 줄일 계획이다.⁷

후기

본 연구는 한국표준과학연구원 길이/시간 측정표준 선진화 사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. ISO 3650, "General Product Specification (GPS) - Length standards - Gauge blocks", 1998.
2. W. Hou, R. Thalmann, "Thermal expansion measurement of gauge blocks", Proc. SPIE, 3477, 272-278, 1998.
3. H. Darnedde, "High-precision Calibration of Long Gauge Blocks Using the Vacuum Wavelength Comparator", Metrologia, 29, 349-359, 1992.
4. E. B. Hughes, "Measurement of the linear thermal expansion coefficient of gauge blocks by interferometry", Proc. SPIE, 2088, 179-189, 1994.
5. M. Okaji, N. Yamada, H. Moriyama, "Ultra-precise thermal expansion measurements of ceramic and steel gauge blocks with an interferometric dilatometer", Metrologia, 37, 165-171, 2000.
6. J. Unkuri, J. Manninen, A. Lassila, "Accurate linear thermal expansion coefficient determination by interferometry", Proc. XVII IMEKO World Congress, 221-224, 2003.
7. T.B. Eom, T.Y. Choi, K. Lee, H. Choi, S. Lee, "A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer", Meas. Sci. Technol., 13, 222-225, 2002.