

게이지 블록 간섭계의 선진화 및 완전 자동화

강주식*(한국표준과학연구원), 김재완(한국표준과학연구원), 서호성(한국표준과학연구원),
이원규(한국표준과학연구원), 김종안(한국표준과학연구원)

Advancing the Gauge Block Interferometer and Automating the Gauge Block Calibration

Chu-Shik Kang(Length Group, KRISS), Jae Wan Kim(Length Group, KRISS), Ho Suhng Suh(Length Group, KRISS), Won-Kyu Lee(Length Group, KRISS), Jong-Ahn Kim(Length Group, KRISS)

ABSTRACT

Gauge blocks are the most widely used material measure in length field in industry. The gauge block interferometer, which is the gauge block measuring system, comprises Twyman-Green type interferometer optics and light sources having precisely known wavelengths. This paper describes the work done for advancing the measurement system and automating the measurement process. The advancing of the system was done mainly by exchanging the spectral lamp with the frequency stabilized lasers, and the automation of measurement was achieved by modifying the hardware and developing the automatic measuring software. As the results of this work, the contrast of interferometric fringes of gauge blocks longer than 100 mm enhanced about 20 times, and the measurement time has reduced down to 50 % by automation.

Key Words : Interferometer (간섭계), Gauge Block (게이지 블록), Frequency stabilized laser (주파수 안정화 레이저), Exact Fraction Method (합치법), Automating (자동화)

1. 서론

게이지 블록은 길이 분야의 기준물 중에서 가장 중요하고 널리 사용되는 단면 기준물(end standard)로서, 다양한 길이 기준물 또는 길이 측정기의 교정에 기준물로서 사용된다. 한국산업규격¹⁾에 의한 정의를 보면, 게이지 블록은 내구성이 있는 재료로 만든, 직사각형 단면의 서로 평행한 측정면을 가지는 단면 표준물로서, 양 측정면은 다른 게이지 블록이나 그와 비슷한 면에 밀착되도록 표면 연마가 되어있는 특성을 지니며, 게이지 블록의 길이는 게이지 블록 측정면상의 점에 있어서의 게이지 점으로부터 다른 측정면에 밀착시킨 동일 재료, 동일 표면 상태인 기준 평면 BP 까지의 거리로 정의된다(Fig. 1 참조). 게이지 블록의 절대 길이를 측정하는 것을 절대 교정이라고 하는데, 이는 빛을 이용한 측정법으로서, 빛의 파장으로부터 미터 정의의 소급성(traceability)을 받게 된다. 절대 교정에 사용되는 장비는 게이지 블록 간섭계인데, 이에 는 파장을 높은 정확도로 알고

있는 광원을 필요로 한다. KRISS에서 보유한 게이지 블록 간섭계의 기존 광원은 약 25년전에 도입한 스펙트럴 램프(spectral lamp) 2개(¹¹⁴Cd 램프, ¹⁹⁸Hg isotope 램프)로, ¹¹⁴Cd등의 경우 수명이 다하여 작동되지 않으며, ¹⁹⁸Hg등도 수명이 거의 다 되어 매우 불안정한 동작을 보이는 문제점을 안고 있었다. 게다가 스펙트럴 램프의 경우 근본적으로 가간섭 길이(coherent length)가 짧은 단점이 있기 때문에 100 mm 이상의 게이지 블록에 대해서는 간섭무늬의 대비(contrast)가 매우 떨어지는 문제점이 있으므로, 이에 본 연구에서는 게이지 블록 간섭계의 광원을 노후된 램프로부터 주파수 안정화 레이저로 교체하여 시스템을 선진화하고, 더 나아가서 복잡하고 시간이 많이 소요되는 기존의 측정 과정을 완전 자동화 하고 교정 시간을 단축시키는 것을 목표로 한다. 본 논문에서는 하드웨어 및 소프트웨어의 개선을 통해 게이지 블록 간섭계 시스템을 선진화하고 완전자동화한 내용에 대해 기술한다.

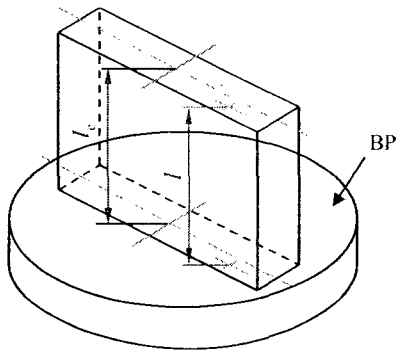


Fig. 1 Definition of gauge block length (BP: platen, l : length of the gauge block at any point, l_c : central length of the gauge block)

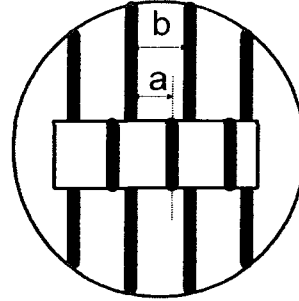


Fig. 2 Typical Fringes of gauge block interferogram

2. 빛을 사용한 게이지 블록 측정 원리

어떤 물체의 길이를 빛의 간섭을 사용하여 측정한다는 것은 결국 그 물체의 길이가 빛의 파장의 몇 배인가를 측정하는 것을 의미한다.

측정환경 하에서의 게이지 블록의 길이 L_T 는 빛의 진공파장 λ_0 을 사용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_T = (m + F) \frac{\lambda_0}{2n} \quad (1)$$

여기서 m 은 매우 큰 정수이며, F 는 0에서 1 사이의 소수이며, n 은 공기의 굴절률이다. 그러므로, 진공파장과 공기의 굴절률, 그리고 정수 m 과 소수 F 만 알면 게이지 블록의 길이를 알 수 있게 되는 것이다. 게이지 블록 간섭계에 사용하는 광원의 빛은 진공파장이 정확히 알려져 있으며, 공기의 굴절률은 공기의 온도, 상대습도, 압력 등을 측정하면 계산해 낼 수 있으며, 소수부 차수 F 는 간섭무늬로부터 직접 측정할 수 있다.

게이지 블록 간섭계에 의해 형성되는 간섭무늬는 Fig. 2와 같은데, 중앙의 직사각형 부분이 게이지 블록이 있는 부분이며 주변은 기준판, 즉, Fig. 1의 BP에 해당한다.

간섭무늬의 간격을 b 라고 하고, 게이지 블록의 간섭무늬가 기준판의 간섭무늬에 대해 어긋난 크기를 a 라고 하면,

$$F = \frac{a}{b} \quad (2)$$

이 된다. m 은 직접 측정할 수 없는 양이다. 3개 이상의 빛의 파장을 사용하여 간섭무늬를 얻고 이들로부터 각각 a_i/b_i 값들을 구한 후, 식(3), 즉, 합치법(exact fraction method)을 이용하면 m 값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(m_1 + \frac{a_1}{b_1}\right) \frac{\lambda_{01}}{2n_1} &= \left(m_2 + \frac{a_2}{b_2}\right) \frac{\lambda_{02}}{2n_2} \\ &= \left(m_3 + \frac{a_3}{b_3}\right) \frac{\lambda_{03}}{2n_3} \end{aligned} \quad (3)$$

3. 간섭계 시스템의 선진화

3.1 하드웨어의 개선

하드웨어의 개선 내용은 크게 2가지로 요약할 수 있다. 첫째는 광원을 주파수 안정화 레이저로 교체한 것이며, 두 번째는 자동화가 용이하도록 하기 위하여 기존의 분광용 회절격자를 평면거울로 교체하고 자동파장선택을 위하여 파장선택기를 설치한 것이다.

3.1.1 광원의 선진화

기존의 스펙트럴 램프는 근본적으로 가간섭 길이가 짧아 간섭무늬의 대비가 나쁜 것 외에도 측정 대상 게이지 블록의 길이가 달라질 때마다 기준 거울의 위치를 다시 설정하여야 하는 단점이 있다. 레이저의 경우에는 가간섭길이가 충분히 길기 때문에 고선명 간섭무늬를 제공할 뿐 아니라, 게이지 블록의 호칭 차수와 무관하게 기준 거울의 위치가 고정되어도 되는 장점이 있다. 본 연구에서 새로운 광원으로 설치한 레이저는 총 3대이며, 파장은 다음과 같은 4 종류를 사용할 수 있다.

(1) 633 nm

633 nm는 Agilent의 Zeeman split 헤테로다인 He-Ne 레이저에서 발진하는 붉은색 파장으로서 주파수 안정도는 2×10^{-9} 정도이다. 편광이 서로 수직하고 주파수가 1 MHz~3 MHz 정도 떨어져 있는 두 개의 모드가 섞여있는데, 각각의 주파수 값을 교정을 통해 알므로, 평균 주파수 값을 사용하거나 아니면 편광기로 한 편광만 선택하여 사용할 수도 있다. 두 경

우 모두 측정 불확도에 미치는 영향은 차이가 나지 않는다.

(2) 532 nm

532 nm는 Nd:YAG 레이저의 적외선 파장인 1064 nm의 이차조화(second harmonic)파장이다. 다이오드 레이저로 펌핑된 Nd:YAG 레이저가 비선형 광학결정인 KTP를 통과하면서 주파수가 1064 nm 빛의 2배이고 파장은 1/2인 532 nm의 빛이 생성된 것인데, 이를 요오드 셀에 통과시켜, 요오드 분자의 R(56)32-0 전이선 중 a_{10} 에 안정화하였다(Fig. 3 참조).

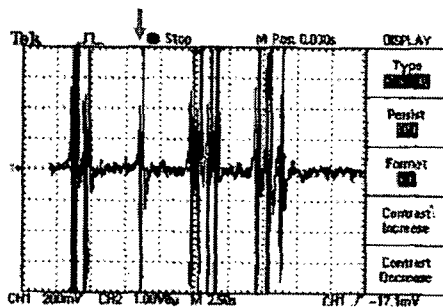


Fig. 3 Spectrum near a_{10} (R(56)32-0)

a_{10} 은 BIPM에서 미터 정의 현시용 주파수로 권고한 것으로, 주파수는 563 260.223 48 GHz이다¹²⁾. KTP 결정의 온도를 미세 조절하면서 스펙트럼을 관찰하는 방법으로, 원하는 주파수가 발견하도록 하였다.

(3) 778 nm

이것은 외부 공진기형 레이저 다이오드(external cavity laser diode: ECLD)의 778 nm 빛을 70 °C인 오븐속의 루비듐(Rb) 셀로 통과시키고, 거울로 되반사시켜 한 번 더 셀을 통과하도록 하여, 루비듐에 의해 이광자(2 photon) 흡수된 빛의 형광을 광증배관으로 검출하고, 록인앰프(lock-in amplifier)를 통해 ECLD의 발진 주파수를 이광자 전이선에 안정시킨 것이다. 안정화 된 레이저의 주파수는 385 285.142 375 GHz 이다¹³⁾.

(4) 1064 nm

1064 nm는 Nd : YAG 레이저의 기본 파장이다. 공진기의 구조상 이차조화파로 전환되지 않은 1064 nm 빛은 532 nm와 함께 섞여서 같은 방향으로 출력되며, 공진기를 조절하여 532 nm 빛이 안정화되면 동시에 1064 nm도 안정화된다. 두 빛은 굴절률이 1.7인 프리즘을 사용하여 분광하여 나눈 후 사용하였다. 안정화된 주파수 값은 281 630.111 74 GHz 이다.

3.1.2 레이저 광의 전송

4개의 레이저 빛을 간섭계 내부로 입사시키기 위해서 광섬유를 사용하였다. 각 레이저에서 나온 빛을 거울 2개와 시준 렌즈를 사용하여 4? 다중모드 광섬유 커플러(coupler)의 입력 포트(port) 4개중 하나에 접속시켰으며, 출력 포트의 광섬유를 길이가 긴 다중모드 광섬유에 연결하여 끝을 간섭계의 입사동(entrance pupil) 위치, 즉, 간섭계 시준 렌즈의 초점 거리 위치에 고정하였다(Fig. 4 참조).

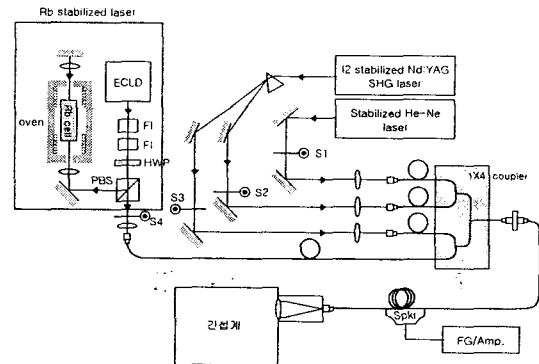


Fig. 4 Schematic diagram of the optical sources. S1,S2,S3,S4:shutters; Spkr:speaker; F1:Faraday isolator; HWP: half waveplate; PBS:polarizing beam splitter; ECLD:external cavity laser diode

이때 다중모드 광섬유의 특성상 수많은 모드간의 공간적 간섭을 통해 형성된 스펙클 잡음을 없애기 위해 광섬유 약 10 m를 감아 스피커면에 부착시키고 60 Hz로 진동시켰다. 광섬유에서 나오는 빛을 렌즈에 의해 평행광으로 만든 후 간섭계로 입사 시켜야 하는데, 빛의 발산 혹은 수렴 여부를 모니터링하기 위하여 충밀리기 간섭계 (lateral shearing interferometer)를 사용하였다¹⁴⁾. 4개의 파장의 빛이 동시에 광섬유로 입사되므로 파장을 선택하기 위해 각 파장의 경로에 셔터를 설치하였다. 셔터는 RC 서보 모터에 의해 개폐되며, 컴퓨터 프로그램에 의해 자동적으로 조작된다.

3.1.3 광학부품의 교체

기존에는 스펙트럴 램프를 광원으로 사용하였기 때문에 집속 렌즈와 지름 1 mm 짜리 개구(aperture)가 간섭계 앞에 있었으며, 램프에서 나오는 빛에 섞여 있는 여러 파장의 빛을 분광하기 위한 회절 격자(diffraction grating)가 있었으나, 광원을 레이저로 교체함에 따라 집속 렌즈와 개구를 제거하였으며, 대신 광섬유를 장착할 수 있는 마운트를 설치하였다. 회절 격자를 사용할 필요가 없으므로 회절격자 대신

평면 거울을 설치하였다.

거울의 마운트는 X-Y 2축으로 기울기를 조절할 수 있도록 제작하였으며, 이를 조정하여 레이저 빛을 기준 거울과 수직하게 입사시켰다.

3.2 소프트웨어의 개선 - 자동화

기존의 측정은 한 파장에 대한 측정이 끝날 때마다 회절 격자의 각도를 조정하여 다음 파장을 찾아낸 후 입사 방향을 정렬하고 나서야 측정을 계속할 수 있었다. 본 연구에 의해 개조된 간섭계의 경우는 한 파장에 대한 측정이 완료되면 프로그램에서 서보모터로 구동되는 셔터를 제어하여 다음 파장만이 광섬유로 입사할 수 있게 하여, 최초로 **측정** 버튼을 클릭하면 4개의 레이저 파장에 대한 간섭무늬 분석이 자동적으로 진행되고 각종 보정값을 계산한 후 최종 교정값까지 한번에 얻어질 수 있도록 하였다.

또한 측정이 신속해짐에 따라 환경요인, 즉, 공기의 온도, 상대 습도, 압력, 이산화탄소 농도 등을 측정직전과 직후에만 측정하게 함으로써 더욱 측정시간을 줄였다. 기존에는 한 개의 게이지 블록을 측정하는데 평균 6분이상 걸렸으나, 본 연구로 개선된 시스템으로는 3분 이내로 측정이 완료되므로, 교정시간이 절반으로 감소되는 효과를 얻었다.

개선된 시스템의 전체적 구조는 Fig. 5와 같다.

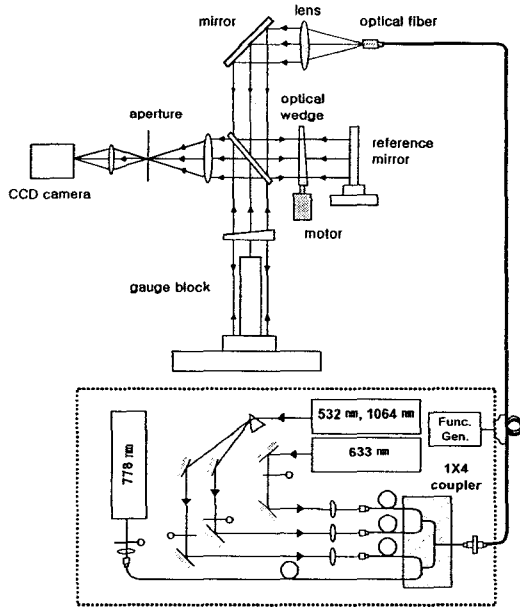


Fig. 5 Schematic of the modified interferometer.

4. 결론

게이지 블록 간섭계를 선진화하기 위해 노후된 스펙트럼 램프 광원을 주파수가 안정화된 레이저 3대로 교체하여, 간섭무늬의 대비를 대폭 향상시켰다. Fig. 6에 200 mm 게이지 블록에 대한 간섭무늬를, 기존 시스템과 개선된 시스템에 대해 비교하였는데, 대비가 20배 향상된 모습을 볼 수 있다.

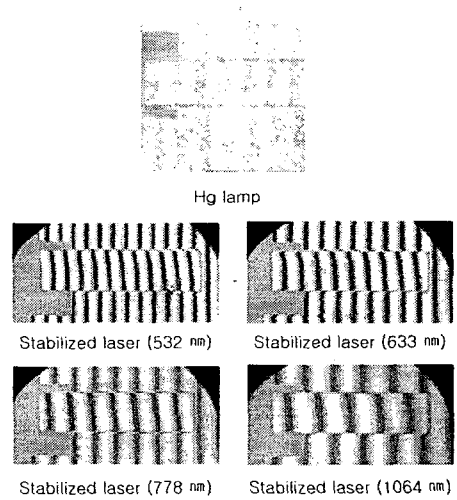


Fig. 6 Comparison of fringe contrast of the interferograms before and after the system advancing.

또한 측정의 완전 자동화를 위해 기존 시스템의 하드웨어를 일부 개조하고 4개의 레이저 파장을 자동으로 선택할 수 있도록 하는 등, 측정 프로그램을 개선하였다. 이에 따라 소프트웨어 상에서 **측정** 버튼을 클릭하기만 하면 4개의 파장에 대한 간섭무늬 포획으로부터 분석, 데이터 계산 및 보정 등이 자동으로 진행되어 최종 교정값이 디스플레이 되게 되었으며, 측정 시간도 기존의 50%로 단축시키는 결과를 얻었다.

참고문헌

1. KS 5201 : 2001 게이지 블록
2. T J Quinn, Metrologia, 40, 103 (2003).
3. Won-Kyu Lee et al., 4th Asian Pacific Laser Symposium, APLS2004, 74 (2004).
4. D. Malacara, "Optical Shop Testing", John Wiley and Sons, New York, Chapter 4, 1st Edition, 1978.