

# 디지털 화상처리를 이용한 게이지 블록의 측정 자동화

고영욱\*, 서호성\*, 이용상\*, 엄태봉\*

## Automatic Measurement of Gage Block Using Digital Image Processing

Y. U. Ko\*, H. S. Suh\*, Y. S. Lee\*, T. B. Eom\*

### Abstract

We have carried out a research on automatic measurement of gage blocks below 250mm and then improved the accuracy of the system, and reduced the measurement time using image processing technique and computer interface. The accuracy of the system is  $(230 + 10330L^2)^{1/2}$  nm (L:m) with confidence level of 95%. We participated APMP gage block intercomparison-1993/1994. The 1st round intercomparison showed that the measured values of all 5 gage blocks were within 21 nm from average.

**Key Words** : Gage block, Interferometer, Fringe Analysis, Air Refractivity, Thermal Expansion

### 1. 서론

길이표준물은 면과 면 사이의 길이로 정의되는 단면 표준물과 선과 선 사이의 길이로 정의되는 선 표준물로 분류할 수 있다. 단면 길이 표준물로 가장 많이 쓰이는 것은 게이지 블록이다. 일반적으로 표준 게이지 블록은 게이지 블록 간섭계(gage block interferometer)를 이용하여 절대 측정된다. 산업체에서 길이의 표준으로 사용되는 게이지 블록은 게이지 블록 비교 측정기와 표준 게이지 블록을 이용하여 비교 교정된다. 교정된 일반 게이지 블록은 다이얼 게이지(dial gage), 높이 미

이크로미터(height micrometer), 스텝 게이지(step gage) 등을 교정하는 데 사용된다.<sup>1)</sup> 250mm까지의 짧은 표준 게이지 블록은 <sup>198</sup>Hg 램프, <sup>114</sup>Cd 램프와 같은 표준 광원을 내장한 게이지 블록 간섭계로 절대 측정하며, 250mm 이상의 긴 표준 게이지 블록은 주파수 안정화 레이저 광원을 내장한 게이지 블록 간섭계로 절대 측정한다.

본 연구원에서는 수동식의 게이지 블록 간섭계를 보유하여 250mm 이하의 게이지 블록에 대한 단면 표준을 유지·보급하여 왔다. 그런데 수동식 측정은 첫째 간섭 무늬의 간격을 읽을 때 개인 오차가 발생하고, 둘

\* 한국표준과학연구원 역학연구부

때 진공조(vacuum chamber)을 이용한 공기굴절률 보정에서 관내의 진공도 저하나 창(window)의 휨 등에서 많은 오차가 생기고, 셋째 게이지 블록의 평면도 및 평행도 측정이 어렵고, 마지막으로 측정할 값으로부터 계산자를 이용하여 정확한 치수를 계산하는 데 많은 시간과 노력이 소요되는 등의 여러 가지 문제점이 있었다.

본 연구에서는 상용 게이지 블록 간섭계의 정확도 향상 및 측정 시간 단축을 위하여 여러 가지 측정을 자동화시켰으며 그 후 게이지 블록 간섭계의 성능을 평가하였다. 수동 측정 방식의 기존 게이지 블록 간섭계에 CCD 카메라와 화상처리 장치를 이용하여 간섭 무늬 측정 및 해석을 자동화하였다. 게이지 블록의 열팽창 보정 및 공기굴절률 보정을 위한 온도, 압력, 상대습도 등의 환경요인을 측정하는 센서들을 컴퓨터 인터페이스 시켜 간섭 무늬 해석 전후로 자동 입력하게 하고 각 센서들의 교정값을 쉽게 이용할 수 있도록 하여 전반적인 측정 과정을 자동화시켰다. 따라서 측정자의 숙련 정도에 따른 개인오차를 줄였으며 게이지 블록의 평면도 및 평행도 측정이 쉽도록 하였고 측정 시간을 1/10 정도로 단축하였다.

## 2. 게이지 블록 간섭계

Fig.1은 게이지 블록 간섭계의 개략도이다. 광원의 스펙트랄 램프(Spectral lamp)에서 나온 빛은 회절 격자에 의해 분광되고 원하는 파장의 빛만이 마이켈슨형 게이지 블록 간섭계의 기준 거울(reference mirror)과 게이지 블록 측정면 및 기준면(base plate)에서 반사하여 광속분할기(beam splitter)에서 재결합되면서 간섭을 일으킨 다음 결상계를 통하여 CCD 카메라에 간섭 무늬가 결상된다. 이 간섭 무늬를 컴퓨터에 내장된 DT 2851 화상 처리 보드(image processing board)로 A/D 변환시켜 화상을 잡은 다음 DT 2858 보조 프로세서(auxiliary processor)로 간섭 무늬 해석을 하여 게이지 블록의 길이, 평면도, 평행도를 구한다. 화상처리 전후의 결과는 컴퓨터에서 D/A 변환시킨 다음 흑백 모니터로 관찰을 하면서 간섭 무늬의 갯수 및 위치 등을 조절한다. GPIB 통신과 수동 입력을 이용하여 게이지 블록의 온도, 공기의 온도, 기압, 상대습도를 각각의 센서로 측정한 다음 열팽창 보정과 공기굴절률 보정을 하여 최종 게이지 블록의 길이를 계산한

다.

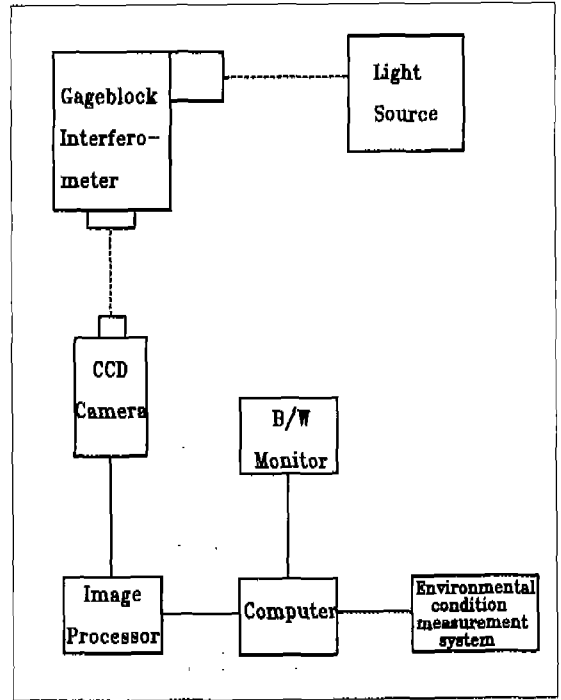


Fig.1 Schematic diagram of gage block interferometer system

## 1. 광학계

본 연구에서 사용한 게이지 블록 간섭계는 Tsugami 사 제품으로서 마이켈슨형 간섭계(Michelson interferometer)이며 광원으로는 2차 표준광원인  $^{136}\text{Cd}$ 나  $^{198}\text{Hg}$ 의 스펙트랄 램프를 사용하고 있다. 간섭계의 구조를 Fig.2에 나타내었다. 램프에서 나온 빛은 집광 렌즈(condensing lens)를 거쳐 슬릿의 작은 구멍을 통과하여 공간 여과(spatial filtering)를 한 후 평행광 렌즈(collimating lens)를 통과하여 평행광으로 만들어진다. 평행광이 회절격자(diffraction grating)에서 회절될 때 회절격자의 회절각도를 조절함으로써 여러 개의 파장 중 하나를 선택한다. 파장 선택된 단색의 빛은 반사거울(reflection mirror)에서 반사되고 광속분할기에서 2개의 광으로 나뉘게 된다. 광속분할기에서 반사된 한쪽 빛은 광학척기(optical wedge)를 거쳐 기준거울(reference mirror)에서 반사된다. 광속분

할기를 투과한 다른 빛은 광학췌기를 거쳐 서로 광학적으로 밀착되어 있는 게이지 블록과 기준면에서 반사된다. 2개의 독립된 경로에서 반사된 각각의 빛은 다시 광속분할기에서 합쳐지면서 간섭이 일어나게 되는데 기준거울과 게이지 블록면 사이의 광경로차에 의해 Fig. 3과 같은 어긋난 간섭 무늬가 나타난다.

이때 기준거울과 게이지 블록과의 각도를 조절함으로써 간섭 무늬의 갯수와 방향을 가변할 수 있으며, 게이지 블록에 간섭 무늬가 놓이는 위치는 광학췌기의 위치를 조절함으로써 가변할 수 있다. Fig. 3에서 게이지 블록과 기준면 사이의 위상차( $\epsilon = d/D$ )가 게이지 블록의 길이를 결정하는 요소 중의 하나인데 기존의 장치는 접안 렌즈의 십자선과 마이크로미터가 부착된 측미현미경으로 측정하였으나 본 연구에서는 접안 렌즈부에 CCD 카메라를 부착하여 간섭 무늬를 CCD 카메라로 관측한 후 화상처리를 이용하여 위상차를 구하였다.

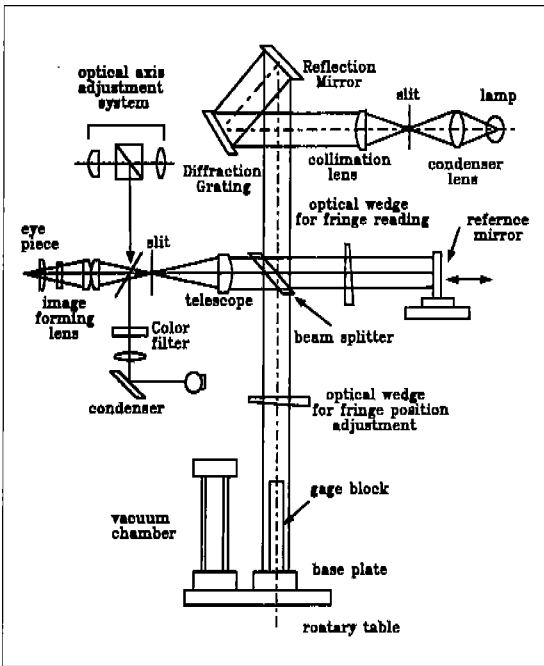


Fig.2 Schematic diagram of optical system of gage block interferometer

## 2. 온도 및 굴절률 측정계

간섭계를 이용하여 게이지 블록의 길이를 절대 측정

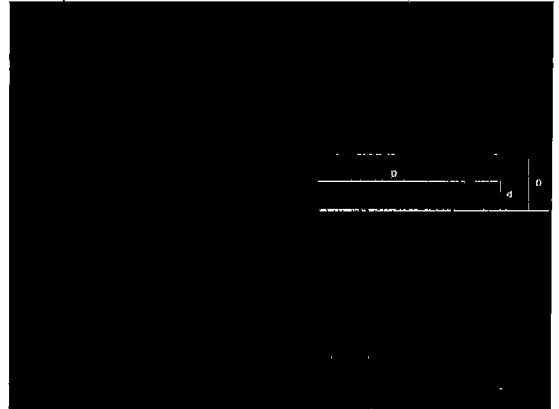


Fig.3 Interferometric fringe of gage block and base plate. phase difference  $\epsilon = d/D$

할 때 측정을 진공에서 실시하지 않을 경우 공기굴절률에 의한 스펙트럼선의 파장 보정이 필요하다. 기존의 장치에서는 Fig.2에서 보여지는 바와 같이 진공조를 이용하여 공기굴절률을 절대 측정하고 있으나 진공조의 진공도 저하 및 창の変형에 의해 공기굴절률 측정값이 부정확할 수 있으므로 공기의 상태, 즉 온도, 압력 및 상대 습도 등을 측정한 후 Edlen 공식을 사용하여 공기굴절률을 계산하였다. Fig.4는 굴절률 측정계의 개략도이다.

한편, 게이지 블록 길이는 20 ℃에서의 길이로 정의되기 때문에 그 온도가 20 ℃가 아닐 때는 열팽창에 의한 길이 보정이 필요하다. 이를 위하여 게이지 블록의 온도를 정밀 측정하여야 한다. 게이지 블록 온도 측정계는 측정 온도계와 기준 온도계로 구성된다. 측정 온도계는 7점의 열전대(thermo couple)와 그 접점들을 지은 스위치(low thermal switch)로 선택하는 선택 스위치 유닛(selection switch unit), 열전대에서 오는 열기전력을 nV 영역에서 측정하는 아날로그 갈바노미터(ana-log galvanometer:분해능  $\pm 0.0076$  ℃, 정확도  $\pm 0.0032$  ℃)로 이루어진다. 열전대는 T type(Copper-Constantan)을 썼으며 열기전력은 40  $\mu\text{V}/\text{℃}$ 이다. 기준 온도계는 열전대의 기준점 온도를 유지하고 제어하는 장치들로 열전대의 기준점 온도를 제어하는 항온조(temperature controlled bath), 항온조의 온도를 측정하는 표준백금저항온도계(SPRT:분해능 0.001 ℃, 정확도  $\pm 0.002$  ℃), SPRT의 온도 측정을 보정하는 표준저항(standard resistor:정확도  $\pm 5$  ppm)과 AC 저항 브리지(AC resistance bridge:



여기서  $n_s$ 와  $n$ 은 각각 표준 상태와 측정중인 대기상태의 공기굴절률이다. (4)식의 A에서  $\lambda_s$ ,  $N_s$ ,  $\epsilon_s$ 는 이미 알고 있는 값이고  $\epsilon$ 은 4개의 파장으로 측정된 각각의 간섭 무늬에서의 위상차이므로 측정 가능한 양이다. 그러므로 각 파장에 대해  $N$ 값만 모르므로 4개의 파장에 대한  $\lambda_s/2$ 와  $(\epsilon - \epsilon_s)$ 값으로부터  $\pm 20 \mu\text{m}$  이내의 값을 갖는  $4L$ 값은 합치법으로 결정할 수가 있다. B에서  $n_s$ 는 이미 알고 있는 값이고  $n$ 은 측정중인 대기상태의 공기굴절률이므로 대기온도, 대기압력, 습도 및  $\text{CO}_2$  농도 등을 측정하여 Edlen 공식을 이용하여 측정하여 얻어진다.

CCD 카메라의 화소(pixel)에서 검출한 간섭 무늬 신호로부터  $\epsilon$ 값 측정, 즉 위상차를 측정하는 방법은 간섭 무늬의 최대점을 부드럽게 연결하여 얻는 간섭 무늬 차수 매김법 (fringe number ordering method)과 상관계수법 (correlation coefficient method)이 있는데 여기서는 게이지 블록 측정면의 중심점 부근 대역의 위상과 기준면 대역의 위상을 순차적으로 비교하므로 위상차의 계산이 평균효과를 가져 화상처리에서 나타나는 오차요인에 비교적 덜 민감한 상관 계수법을 이용하였으며 그 원리를 Fig.5에 나타내었다.<sup>2)</sup>  $f_p(i)$ 는 기준면에서의 간섭 무늬의 세기,  $f_g(i)$ 는 게이지 블록 측정면에서의 간섭 무늬의 세기이고  $f_r(i)$ 는 계산된 상관계수이다. 상관계수를 계산하기 위해서 다음과 같은 식을 이용한다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [f_g(i) \cdot f_p(i)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n f_g^2(i)} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n f_p^2(i)}} \quad (5)$$

여기서  $n$ 은 기준면과 게이지 블록의 측정면에서 각각 샘플링된 데이터 갯수이다. 계산하는  $f_g(i)$ 의 중심 부분에서 좌우 같은 간격으로  $\Delta n(n_1 - n_2)$ 개의 간섭 무늬 세기 데이터를 취한 다음 기준면의 간섭 무늬 세기 데이터에서  $i=1$ 부터 같은 수의  $\Delta n$ 개의 데이터와 상관계수  $r(1)$ 을 구한다. 다음 같은 기준면의 데이터를 하나 이동하여  $i=2 \sim (\Delta n + 1)$ 에서의 상관계수  $r(2)$ 를 구한다. 이하 같은 방법으로 전체의 상관계수의 함수  $f_r(j)$  ( $j=1, 2, 3, \dots, {}^{(n-\Delta n)}$ )를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_r(j) = \frac{\sum_{k=1}^{\Delta n} [f_g(k) \cdot f_p(1)]}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\Delta n} f_g^2(k)} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{\Delta n} f_p^2(1)}} \quad (6)$$

여기서  $k = i + n_1 - 1$ ,  $l = i + j - 1$ 이다.

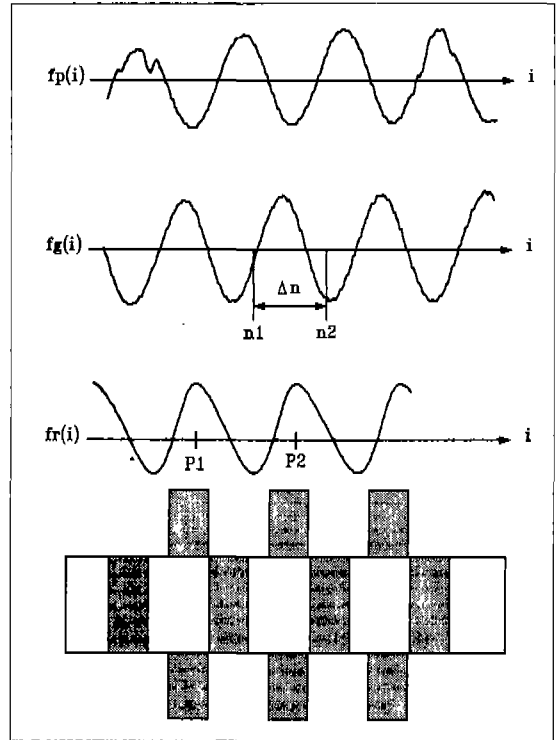


Fig.5 Calculation of difference by correlation coefficient

- $f_p(i)$  : sampled fringe intensity of base plate
- $f_g(i)$  : sampled fringe intensity of gage block
- $f_r(i)$  : correlation coefficients between  $f_p(i)$  and  $f_g(i)$
- phase difference  $\epsilon = (n_1 - P_1) / (P_2 - P_1)$

Fig.5에 나타난  $f_r(i)$ 의 계산 결과에서 peak치  $P_1$ ,  $P_2$ 를 구할 수 있다. Fig.3과 Fig.5에서  $D$ 와  $d$ 를 구해보면  $D = P_2 - P_1$ ,  $d = n_1 - P_1$ 이다. 따라서 위상차는

$$\epsilon = d/D = (n_1 - P_1) / (P_2 - P_1) \quad (7)$$

으로 구할 수 있다.  $^{114}\text{Cd}$  램프의 4개 파장으로 8 mm 게이지 블록에서의 측정된 간섭 무늬 세기와 상관계수를 Fig.6에 나타내었다. 본 실험에서는 기준면과 게이지 블록 측정면에서의 샘플링 데이터 (sampling data) 갯수를 250개로 하였고  $\Delta n$ 의 갯수를 50개로 하였다.

## 2. 게이지 블록 평면도 및 평행도 측정

게이지 블록의 평면도 (flatness) 측정은 게이지 블록

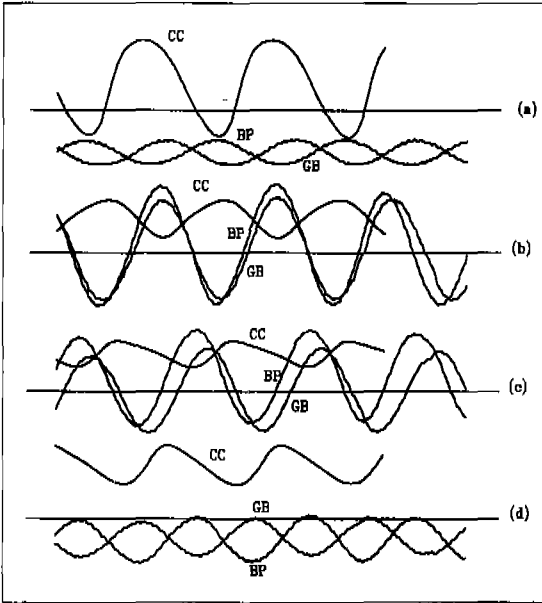


Fig.6 Experimental results for 8 mm gage block. Light source is <sup>114</sup>Cd lamp. Wavelengths are (a) 644 nm (b) 508 nm (c) 480 nm (d) 468 nm. GB : intensity of gage block fringe BP : intensity of base plate fringe CC : correlation coefficient

측정면의 간섭 무늬를 FFT(Fast Fourier Transform) 방법으로 해석하여 기준 거울에 대한 게이지 블록의 측정면의 형상을 구한 다음 경사 각도를 보정하여 최종적인 게이지 블록의 측정면에서의 평면도를 측정하였다.<sup>3)</sup> 8 mm 게이지 블록의 평면도를 Fig.7에 나타내었다.

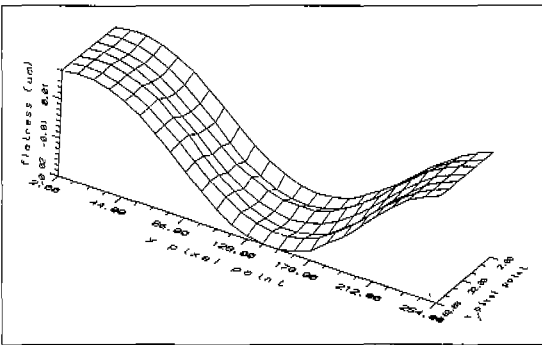


Fig.7 Flatness of 8 mm gage block

게이지 블록의 평행도(parallelism)는 평면도와 같은 방법으로 구하지만 최종 단계에서 외곽 부분에서의 최저점을 연결한 경사각 보정을 하지 않고 최대점과 최저점의 차이를 구하면 된다.

### 3. 게이지 블록의 보정

게이지 블록의 길이를 측정할 때의 열팽창 보정과 공기굴절을 보정 방법을 하는 방법을 아래에 설명한다.

#### 3-1. 공기굴절률의 보정

진공 파장에 대한 공기굴절률의 보정은 일반적으로 1966년에 처음 발표된 Edlen 공식을 이용한다.<sup>4)</sup> Edlen 공식은 그 후 여러 실험을 통하여 많은 개정이 되어  $3.3 \times 10^{-6}$  정도의 정확도를 가지게 되었다. 아래 식은 표준 상태의 파장에서의 공기굴절률과 측정 환경에서의 공기굴절률의 관계를 나타낸 것이다.

$$\lambda = \lambda_s \times n_s / n \quad (8)$$

- $\lambda$ : 측정 환경에서의 파장
- $\lambda_s$ : 표준 상태에서의 파장
- $n$ : 측정 환경에서의 공기굴절률
- $n_s$ : 표준 상태에서의 공기굴절률

여기서 측정 환경에서의 공기굴절률  $n$ 은 다음과 같다.

$$n = n_s + 3.57 \times 10^{-7} \Delta H - 9.24 \times 10^{-7} \Delta T_a - 5.61 \times 10^{-8} \Delta P + 1.5 \times 10^{-8} \Delta K \quad (9)$$

- $n_s$ : 표준상태에서의 공기굴절률
- $\Delta H$ : 760 mmHg로부터의 기압차(mmHg)
- $\Delta T_a$ : 온도 20 ℃로부터의 온도차(℃)
- $\Delta P$ : 수증기 분압 10 mmHg로부터의 수증기 분압차 (mmHg)
- $\Delta K$ : CO<sub>2</sub> 농도 0.03%로부터의 CO<sub>2</sub> 농도차 (0.01%)

여기서  $n_s$ 는 K.Birch가 자신이 제안한 공기굴절률식에 표준 상태의 값을 대입하여 계산된 값으로 1.00027131의 값을 이용하였다.<sup>5)</sup>

#### 3-2 열팽창 보정

길이 측정에 있어 표준 온도는 20℃로 되어 있기 때문에 피측정물의 온도를 정확히 측정하여 열팽창에 의

한 오차 보정을 하지 않으면 안된다. 게이지 블록의 열 팽창에 의한 보정은 다음과 같은 식을 이용한다.

$$L(20^{\circ}\text{C}) = L(T) / \{1 + \alpha(T - 20^{\circ}\text{C})\} \quad (10)$$

$L(T)$  : 온도 T에서의 길이

$L(20^{\circ}\text{C})$  : 20°C에서의 길이

$\alpha$ : 선형 열팽창 계수

#### 4. 측정 결과

본 게이지 블록 간섭계의 국제적 신뢰성 평가를 하기 위해 보유하고 있는 재질이 chrome carbide인 표준기급 게이지 블록을 측정하여 독일 연방물리청 (PTB)에서 교정받은 값과 비교를 하였다. 측정된 결과를 Table 1에 보였다. 측정 결과에서 보듯 게이지 블록 길이 25 mm까지는 서로간의 측정 결과가 잘 일치하였다. 100 mm의 게이지 블록의 경우 Hg나 Cd의 스펙트럼선의 가간섭 길이(coherence length)가 짧아 간섭 무늬의 가시도가 좋지 않아 측정값의 차이가 있지만 본 PTB의 검사 성적서의 오차한계의 값인  $\pm(0.02 + 0.2L)$  (L:m) 내에 들어와 신뢰성이 있다고 판단하였다.

Table 1 Comparative data for the evaluation of gage block interferometer

nominal length (mm)	correction value of KRISS ( $\mu\text{m}$ )	correction value of PTB ( $\mu\text{m}$ )
1.0	-0.01	-0.01
3.0	-0.03	-0.04
10.0	+0.06	+0.03
25.0	+0.04	+0.04
100.0	+0.05	+0.09

한편 APMP(Asia Pacific Metrology Program) Gauge Block Intercomparison에 참가하여 1993년 1, 3, 8, 40, 100 mm 등 5개의 게이지 블록을 절대 측정하였다. 게이지 블록의 재질은 steel이며 열팽창 계수는  $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 하였다. 길이, 평면도 및 평행도를 국제 표준 규격인 ISO 3650에 따라 10번 반복 측정하였다. 측정 광원은 1, 3, 8 mm의 게이지 블록은  $^{114}\text{Cd}$  램프를, 40, 100 mm 게이지 블록은  $^{198}\text{Hg}$  램프를 사용하였으며, 1차 순회 평가가 완료된 93년 12월 현재 모든 게이지 블록이 측정값이 참가국 전체 평

균값으로부터 21 nm 이내 에 있다고 알려졌다.

#### 5. 성능 평가

게이지 블록 간섭계의 측정 오차는 많은 요인으로부터 발생되기 때문에 이 오차요인을 정확하게 분석하여 최소화하도록 해야 한다. 게이지 블록의 오차 요인의 분석은 영국 NPL의 K. G. Birch와 독일 PTB의 H. Darnedde가 분석한 방법을 참고로 하였고,<sup>6,7,8</sup> 불확도의 산정 방법은 WECC(Western European Calibration Cooperation)에서 만든 불확도 산정에 관한 권고안을 따라 수행하였다.<sup>9</sup>

##### 5-1. 스펙트럼 등의 파장안정도에 의한 불확도

간섭계 광원으로 쓰는  $^{114}\text{Cd}$ ,  $^{198}\text{Hg}$  스펙트럼 등의 진공 파장의 불확도는  $^{114}\text{Cd}$  등의 경우  $\pm 0.6 \times 10^{-7}$ 이고  $^{198}\text{Hg}$  등의 경우  $\pm 0.5 \times 10^{-7}$ 이다. 이를 길이 측정에 대한 불확도의 영향으로 바꾸면  $\pm 50L$  nm이다. 이 오차는 계통 오차로 분류되고 균일 분포를 가지므로 분산(variance)은  $S_1^2 = (50L)^2 / 3 = 833L^2$  로 주어진다.

##### 5-2. 온도 요인에 의한 오차 보정과 불확도

1) 표준백금저항온도계 (SPRT)의 보정과 불확도 :

SPRT의 경우 ITS-90에 따라 한국표준과학연구원 온도그룹에서 교정을 받았으며 불확도는  $\pm 2$  mK이다.

2) 저항비(resistance ratio) 측정의 보정과 불확도 :

AC 저항 브릿지와 표준 저항은 한국표준과학원 전기 그룹에서 교정을 받았으며 불확도는 각각  $\pm 0.2$  mK과  $\pm 5$  ppm이다. 여기서 표준 저항의 불확도는 무시할 수 있다.

3) 갈바노미터의 읽음 오차의 불확도

갈바노미터의 최소 눈금은 온도의 7.2 mK에 해당된다. 이 눈금을 1/2 정도 분해한다고 하면 불확도는  $\pm 3.6$  mK이다.

1) - 3)의 요인에 의한 온도 불확도의 총합은  $\pm 4.1$  mK이다.

##### 5-3. 게이지 블록 열팽창 보정시의 불확도

게이지 블록 열팽창 보정시의 길이 측정에 관련된 불확도는  $\Delta T \cdot \alpha \cdot L$ 이다. 여기서  $\Delta T$ 는 온도의 불확도,  $\alpha$ 는 열팽창 계수이다.  $\Delta T$ 의 불확도는  $\pm 4.1$  mK이므로, 일반적인 게이지 블록의 재질은 steel( $\alpha = 11.5 \times$

10<sup>6</sup>/°C)에 대한 열팽창을 보정할 때 생기는 불확도는 ±46 Lnm이다. 이를 균일 분포로 보면 분산은 s<sub>2</sub><sup>2</sup> = (46L)<sup>2</sup>/3 = 705 L<sup>2</sup> nm<sup>2</sup>이다.

5-4. 게이지 블록에 있어 온도 구배와 시간에 따른 온도 변화의 보정과 불확도

게이지 블록의 측정시 온도 구배(gradient)는 짧은 게이지 블록의 경우 무시할 수 있으며 시간에 따른 온도 변화의 보정은 측정 전후의 값을 평균하여 행하였다. 한 게이지 블록당 측정 시간이 10분 정도이며 그 사이의 온도 변화는 5 mK 이하로 나타났다. 간섭 무늬를 해석하여 위상차를 계산할 때 걸리는 시간은 1분 이내이므로 이 평균값과 각 파장에서의 위상차를 계산할 때 나타나는 온도차는 ±1 mK 정도이다. 길이에 대한 영향은 5-3의 경우와 같은 식으로 생각할 수 있으므로 ±12 Lnm가 된다. 균일 분포를 가진다고 생각할 수 있어 분산은 s<sub>3</sub><sup>2</sup> = (12L)<sup>2</sup>/3 = 48L<sup>2</sup> nm<sup>2</sup>이다.

5-5. 게이지 블록의 열팽창 계수의 오차에 의한 불확도

재질이 steel인 게이지 블록인 경우 일반적으로 열팽창 계수의 불확도는 ±0.3×10<sup>-6</sup> 이내로 주어진다. 게이지 블록 간섭계 내의 온도는 0.1 °C 이내로 변화하므로 열팽창 계수의 오차에 의한 게이지 블록 길이 측정의 불확도는 ±30L nm이며 이것은 균일 분포를 가지므로 분산은 s<sub>4</sub><sup>2</sup> = (30L)<sup>2</sup>/3 = 300L<sup>2</sup> nm<sup>2</sup>이다.

5-6. 위상차 계산시의 불확도

게이지 블록 측정시 사용하는 4개의 파장으로 각각 위상차를 결정할 때 99%의 신뢰 구간에서 우연오차에 의한 불확도가 ±9 nm이다. 분산을 계산하면 s<sub>5</sub><sup>2</sup> = (9/3)<sup>2</sup> = 9 nm<sup>2</sup>이다.

5-7. 공기굴절률식의 불확도

Edlen 공식은 1966년 발표 이후 많은 개선을 거쳐 오늘날 3.3×10<sup>-8</sup> 정도의 불확도를 갖는 것으로 알려졌다. 이를 길이 측정의 불확도로 계산하면 ±33L nm이다. 이것은 균일 분포를 가지므로 분산은 s<sub>6</sub><sup>2</sup> = (33L)<sup>2</sup>/3 = 363L<sup>2</sup> nm<sup>2</sup>이다.

5-8. 공기굴절률 계산의 불확도

공기굴절률의 계산에 필요한 요소는 공기의 온도, 압

력, 상대 습도, 수증기 분압, 이산화탄소 농도 등으로 이루어지므로 식 (9)의 각항에 대한 불확도를 계산하였다.

1) 온도가 1°C 변할 때 공기굴절률은 9.24×10<sup>-7</sup> 변화하므로 길이 측정에서의 영향은 924 Lnm이다. 5-2의 1)-3)에서 계산한 온도의 불확도는 ±4.1 mK이므로 공기굴절률에서의 온도의 영향에 의한 길이 측정의 불확도는 ±3.7L nm이다. 이것은 균일 분포를 하므로 분산은 s<sub>7</sub><sup>2</sup> = (3.7L)<sup>2</sup>/3 = 363L<sup>2</sup> nm<sup>2</sup>이다.

2) 공기 압력이 1 mmHg 변화할 때 공기굴절률은 3.57×10<sup>-7</sup> 변화하므로 길이 측정에서의 영향은 357L nm이다. 한국표준과학원 압력 그룹에서 교정받은 압력계의 불확도는 ±0.015 mmHg이므로 공기굴절률에서 압력의 영향에 의한 길이 측정의 불확도는 ±5.4L nm이며 이는 균일 분포를 가지므로 분산은 s<sub>8</sub><sup>2</sup> = (5.4L)<sup>2</sup>/3 = 9.7L<sup>2</sup> nm<sup>2</sup>이다. 측정 전후의 압력의 차이는 0.008 mmHg를 초과하지 않으므로 실제의 압력값과 평균 압력과의 차이에 의한 영향은 매우 작아 무시한다.

3) 상대 습도가 1% 변화할 때 공기굴절률은 1.0×10<sup>-6</sup> 정도 변한다. 한국표준과학원 습도 그룹에서 교정받은 습도계의 불확도는 ±3%이므로 이것을 길이 측정에 대한 불확도로 환산하면 ±30L nm이다. 이것은 균일 분포를 하므로 분산은 s<sub>9</sub><sup>2</sup> = (3L)<sup>2</sup>/3 = 300L<sup>2</sup> nm<sup>2</sup>이다. 측정 전후의 상대 습도의 차이는 0.1%를 초과하지 않으므로 실제의 상대습도값과 평균 상대 습도의 차이에 의한 영향은 매우 작아 무시한다.

4) 이산화탄소의 농도가 0.03%에서 0.01% 변할 때 공기굴절률은 1.5×10<sup>-8</sup> 변화한다. 일반적으로 측정실 환경에서 이산화탄소의 함유량은 550 ppm - 350 ppm 정도이며 실험실 내의 인원에 따라 변하므로 이산화탄소 함유량의 불확도를 ±50 ppm 이내로 산정할 수 있다. 이를 길이 측정에 대한 불확도로 환산하면 ±7.5L nm이다. 이것은 균일 분포를 하므로 분산은 s<sub>10</sub><sup>2</sup> = (7.5L)<sup>2</sup>/3 = 19L<sup>2</sup> nm<sup>2</sup>이다.

5-9. 간섭계에 의한 요인의 오차 보정과 불확도

1) 입사광의 경사 오차의 불확도

광학계에서 직경 a인 원형개구(circular aperture)에 의한 입사광의 경사오차는

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi} \tan^{-1} \frac{S(v) - \frac{1}{v} \int_0^v S(v) dv}{C(v) - \frac{1}{v} \int_1^v C(v) dv} \quad (11)$$



로 주어진다. 여기서

$$V = \sqrt{\frac{4L}{\lambda} \cdot \frac{a}{2f}} \quad (12)$$

이며 L은 gage block의 길이, λ은 파장, f는 평행광 렌즈 초점거리이며 S(v), C(v)는 각각 Fresnel 적분을 나타낸다. a가 0에 가까우면 δ값도 0에 접근하며 a가 1 mm 이하일 때는 무시할 수 있다. 여기서 개구의 직경은 1 mm이므로 입사광의 경사오차는 무시한다.

2) 비이상적인 광학계에 의한 오차

게이지 블록 간섭계의 기준면의 이상적 평면이 아닌 것과 광축의 어긋남 등에 의한 오차때문에 일어나는 간섭 무늬 읽음의 불확도는 약 ±1/30 fringe(=±9 nm) 정도로 생각할 수 있다. 이때 이것은 균일 분포이므로 분산은  $s_{11}^2 = 9^2/3 = 27L^2 \text{ nm}^2$ 이다.

3) 평면도/평행도에 의한 불확도

ISO 3650에서는 100 mm까지의 ○○급 게이지 블록의 경우 평면도의 한계 오차가 0.05 μm이고 평행도의 한계가 0.07 μm로 주어진다. 이를 측정점이 중심점에서 전체 길이의 1/20 정도 위치에서 벗어나고 있지 않다고 생각했을 때 불확도는 다음과 같이 주어진다.

$$\pm[(70/20 \times 1/2)^2 + (50/20 \times 1/2)^2]^{1/2} = \pm 2 \text{ nm} \quad (13)$$

이것은 균일 분포하므로 분산은  $s_{12}^2 = 2^2/3 = 1.3 \text{ nm}^2$ 이다.

5-10. 위상 변화 요인에 의한 불확도

1) 반사로 인한 위상 변화의 불확도 :

게이지 블록과 기준면의 재질이 다른 경우 반사에 의한 위상 변화가 다르므로 보정을 해야 하나 본 측정에서는 같은 재질을 썼으므로 보정값을 0으로 한다.

2) 게이지 블록의 표면 거칠기에 의한 불확도 :

게이지 블록의 측정면과 기준면의 표면 거칠기의 차이에 의하여 위상 변화의 오차가 생긴다. 이러한 표면 거칠기에 의한 게이지 블록의 길이 측정의 불확도는 ± 6 nm 정도 된다. 이것은 균일 분포를 하므로 분산은  $s_{13}^2 = 6^2/3 = 12 \text{ nm}^2$ 이다.

5-11. 밀착에 의한 오차 요인의 보정과 불확도

밀착에 의한 오차의 불확도는 게이지 블록 간섭계로 측정된 기존의 데이터를 참고로 하여 ±5 nm로 주었

다. 이는 균일 분포를 하므로 분산은  $s_{14}^2 = 5^2/3 = 8.3 \text{ nm}^2$ 이다.

5-12. 전체 불확도의 산정

전체의 불확도  $U_T$ 를 산정하는 식은 다음과 같다.

$$U_T = K \cdot \left( \sum_{i=1}^n s_i^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

여기서  $s_i$ 는 각 오차 요인에서의 불확도의 분산, n은 오차 요인의 갯수, K는 t분포에서 측정 횟수와 신뢰 구간에 의해 결정되는 상수이다. 신뢰 구간을 95%로 하고 측정은 10번을 반복했으므로 K=2로 하였다.

$$\begin{aligned} U_T &= 2 \times [9 + 27 + 1.3 + 12 + 8.3 + 833L^2 \\ &\quad 705L^2 + 48L^2 + 300L^2 + 363L^2 + 4.6L^2 \\ &\quad 9.7L^2 + 300L^2 + 19L^2]^{1/2} \\ &= (230 + 10330L^2)^{1/2} \text{ nm} \end{aligned} \quad (15)$$

Table 2에 게이지 블록 간섭계에 의한 측정 불확도

Table 2 Sources and estimations of uncertainty

sources of uncertainty	kinds of uncertainty	physical uncertainty	uncertainty in length with 95 % confidence level (nm)
wavelength of spectral lamp	S	$5 \times 10^{-6}$	58L
gage block temperature			
a. calibration	S	4 mK	53L
b. measurement	S	1 mK	14L
a of gage block	S	$0.3 \times 10^{-6}$	35L
phase difference reading	R	9 nm	10.4
air ref. index formular	S	$3.3 \times 10^{-8}$	38L
air ref. index calculation			
a. temperature	S	4 mK	4.3L
b. pressure		0.015 mmHg	6.2L
c. relative humidity		3%	35L
d. CO <sub>2</sub> concentration		50ppm	8.7L
interferometer			
a. slit	S	N	-
b. nonideal optics		1/30 fringe	10
c. F/P		2 nm	2
phase change			
a. reflection	S	N	-
b. surface roughness		6 nm	6.9
wringing	S	5 nm	5.8

(S : systematic error, R : random error, N : negligible, F/P : flatness/parallelism)

를 각 항별로 정리하였다. 각항의 불확도는 95%의 신뢰 구간에서 산정하였다.

불확도 요인 중에서 큰 것은 스펙트럼선의 파장값, 게이지 블록의 열팽창 계수와 공기굴절률의 불확도이다. 파장의 불확도를 줄이기 위해서는 스펙트럼 등 대신 주파수 안정화 레이저를 쓰면 10배 정도 불확도를 줄일 수 있다. 그리고 열팽창 계수의 불확도를 줄이기 위해서는 게이지 블록의 열팽창 계수를 전용 측정하는 장치가 필요하다. 공기굴절률의 불확도는 광원으로 레이저를 쓸 때 Edlen 공식 대신 간섭법에 의하여 절대 측정하거나 더 정확한 측정 센서를 쓰면 줄일 수 있다.

## 6. 결 론

기존의 Tsugami사의 게이지 블록 간섭계를 이용한 게이지블록의 측정 자동화를 수행하여 측정의 정확도를 높이고 측정 시간을 단축하였다. 종래 간섭 무늬의 위상차를 목록과 수동으로 측정하고 계산하던 것을 CCD 카메라와 화상 처리를 이용하여 측정하였다. 이에 따라 게이지 블록의 길이, 평면도와 평행도를 컴퓨터를 이용하여 작업자의 숙련도에 의존하지 않고 빠른 시간에 자동 측정할 수 있게 되었다. 그리고 일단 측정이 끝난 후 계산자를 이용하여 사후 처리하던 것을 측정과 동시에 실시간으로 계산할 수 있게 하였다. 열팽창 보정과 공기굴절률 보정은 온도, 대기압, 상대 습도 등의 환경 요인을 직접 측정, 컴퓨터에 자동 입력함으로써 측정과 동시에 보정이 이루어지게 하였다.

개선한 게이지 블록 간섭계를 사용하여 표준급 게이지 블록을 절대 측정하였다. PTB에서 교정한 값과 비교한 결과 모든 측정값이 PTB의 교정 불확도인  $\pm (0.002 + 0.2L) (L:m)$  내에 들어와 상호 신뢰성을 확인하였다. 한편 1993-1994년에 걸쳐 시행중인 APMP Gauge Block Intercomparison에 참가하여 게이지 블록의 길이, 평면도와 평행도를 측정하였다. 1차 순회 평가가 끝난 현재 5개의 게이지 블록 측정값 모두가 평균값에서 21 nm 이내의 값을 가진다고 알려졌다.<sup>10)</sup> 게이지 블록 간섭계의 전체 불확도는 95%의 신뢰 구간

에서  $(230+1033L^2)^{1/2}$  nm로 확인하였다. 본 연구에서 수행한 게이지 블록 측정 자동화로 250 mm 이하의 게이지 블록의 교정시 정확도를 높이고 단면 표준의 산업체 보급을 좀더 원활히 할 수 있게 되었다.

## 참고문헌

1. 정명세 외, 길이(상), 정밀 측정교재 85-002, 공업진흥청, pp.15~17, 1985.
2. H. Osaka, H. Matumoto, "Analysis of Interference-Fringe Patterns for Length Measurement of Gauge Blocks", Kogaku, Vol.19, pp.702~706, 1990.
3. M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry", J. Opt. Soc. Am., Vol. 72, pp/156~160, 1982.
4. B. Edlen, "The Refractive Index of Air", Metrologia, Vol.2, pp.71~80, 1966.
5. K. P. Birch, "The results of comparison between calculated and measured values of the refractive index of air", J. Phys. E., Vol. 21, pp.694~695, 1988.
6. K. G. Birch, "Uncertainties in the Measurement of Gauge Blocks by Interferometry", NPL Report MOM 29, 1979.
7. H. Darnedde, "High-precision Calibration of Long Gauge Blocks Using the Vacuum Wavelength Comparator", Metrologia Vol. 29, pp.349~359, 1992.
8. Y. P. Lan, W. C. Chang, "System evaluation of gauge block interferometer", ITRI report 07-3-83-0007, 1993.
9. "WECC paper on measurement uncertainty", BIML 93 NO, 1039 BA/NC, 1993p.
10. Nick Brown, private communication.