

표준구직경 정밀측정 간섭계 제작

장경호, 이용재, 서호성, 도진열, 강시홍

Construction of Precision Measurement Interferometer
for Standard Ball Diameter

Kyung-Ho Chang, Yong-Jae Lee, Ho-Suhng Suh, Jin-Yeol Do, Si-Hong Kang

요약

구직경의 정밀측정을 위한 간섭계를 제작하고 직경이 78 mm인 철제구를 측정하였다. 제작된 간섭계는 두 평행판 사이에 구를 설치할 수 있도록 제작된 에탈론을 단일변형체의 평행이동판 위에 설치하고 구의 양면과 에탈론의 두 반사면 사이에서 생성되는 두 간섭신호의 위상차로부터 구 직경을 측정할 수 있도록 하였다. 위상차는 광검출기로 감지된 한 쌍의 간섭무늬신호에 대한 상관계수로부터 계산하였다. 측정결과 철제구의 직경은 78.1893544 mm 였으며, 측정불확도는 95.5 %의 신뢰수준에서 29 nm로 나타났다.

Abstract

We constructed an interferometer for precise measurement of the ball diameter, and measured the diameter of steel ball with a diameter of 78 mm. The interferometer was consisted of etalon to instal ball between two parallel plates and placed on the the monolithic flexure to be moved parallel. The ball diameter was calculated from phase difference of one pair of signals interfered between the both sides of ball and two parallel plates, and the signals was observed by photodetectors with scanning the etalon. The results showed that the diameter of steel ball was 78.1893544 mm and measurement uncertainty of 29 nm in confidence level of 95.5 %.

1. 서론

밀도표준은 진구도(眞球度)가 좋은 밀도표준구(표준구)로 구현되며, 질량과 길이표준에 의해서 유도된다. 구의 직경측정은 구의 부피를 결정하는 직접적인 요소로서 고도의 정밀정확한 측정이 요구된다. 표준구는 정유체 질량측정장치(hydrostatic weighing)⁽¹⁾를 사용하여 밀도기준물(물, 수은 등)의 절대값 유도에 사용되므로 1 ppm 이상의 정확도를 유지하여야 한다. 표준구는 팽창계수가 $1 \times 10^{-6}/K$ 보다 작은 유리로 제작되며 90 mm 정도의 직경을 가지고 있다.^(2,3,4,5) 유리구는 제작

후 10 년 동안 3~4 ppm의 경년 변화가 있으므로⁽⁶⁾ 최근에는 단결정체인 실리콘으로 제작하고 있다. 표준구의 직경은 기술이 앞선 몇몇 선진 연구그룹에서는 전용의 간섭계로 2 nm의 불확도로 측정하여 밀도표준을 0.3 ppm의 불확도로 유지하고 있다. 본 연구그룹에서는 구직경을 직접 측정할 수 있는 계측계기로 300 nm의 정확도를 가진 형상측정기만을 보유하고 있으므로 선진국에 비하여 측정 정확도가 뒤떨어지기 때문에 밀도의 국가표준을 위해 다른 나라의 밀도표준구와 비교측정하여 2 ppm의 불확도로 유지해 왔다. 구의 직경측정용 간섭계는 1972년 미국 NIST(국립표준기술연구원)의 Saunders가 처음으로 고안하였다.⁽⁷⁾ Saunders

한국표준과학연구원 (Korea reaseach Institute of Standards and Science)

<접수일자 : 1999년 4월 23일>

는 두 평행판으로 구성된 에탈론 사이에 표준구를 놓고 plate와 표준구면 사이에서 생긴 Haidinger fringe를 분석하여 간섭차수의 소수부(ω)를 결정하여 구 직경을 31 nm의 불확도로 측정하였다. 그후 1992년 일본 NRLM(국립계량연구소)의 Fujii는 아보가드로 상수 직접측정을 위해 실리콘 단결정 구에 대한 직경을 3 nm (간섭무늬차수의 0.01 order)로 측정하였다. 그는 에탈론을 이동하여 얻은 한쌍의 간섭신호에 대한 상관계수를 계산하여 간섭차수 소수부(ω)를 계산하는 방법을 사용하였다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 밀도표준을 국제수준으로 독자적으로 확립하기 위해 구 직경 정밀측정을 위해 Fujii 방법을 이용한 간섭계를 제작하고 직경이 78 mm 인 철제구 직경을 측정하고 불확도를 산출하였다.

II. 측정원리

Fabry-Perot 에탈론의 평행한 plate 사이에 Fig. 1과 같이 표준구를 설치하고 에탈론의 플레이트(plate)면과 구의 정점에서 반사되는 레이저 빛의 광로차로 인하여 생긴 Haidinger fringe를 분석하여 구의 직경을 다음과 같이 구한다.

$$D = L - d_1 - d_2 \tag{1}$$

여기서, L은 에탈론 플레이트의 안쪽면 사이의 공간거리이며, $d=(d_1+d_2)$ 는 에탈론의 플레이트와 구 사이의 거리로서 간섭무늬와의 관계는 다음과 같다.

$$d = (N + \epsilon) \lambda / 2 \tag{2}$$

여기서 N은 간섭차수의 정수부이며, ϵ 는 소수부이다. 구의 직경을 알기 위해서는 L과 $d=d_1+d_2$ 를 측정하여 식(1)을 사용하여 구하게 된다.

$d=d_1+d_2$ 를 구하기 위해서는 에탈론을 빛의 축방향으로 연속 이동시킨다. 에탈론을 δd 만큼 이동하면 간격은 d_1 및 d_2 는 각각 $d_1 - \delta d$, $d_2 + \delta d$ 가 되며, 이들의 간격에 대한 간섭무늬의 위상 F_1 및 F_2 는 각각 다음과 같다.

$$F_1 = 2(d_1 - \delta d) / \lambda = N_1 + \epsilon_1 - \delta \phi \tag{3}$$

$$F_2 = 2(d_2 + \delta d) / \lambda = N_2 + \epsilon_2 + \delta \phi \tag{4}$$

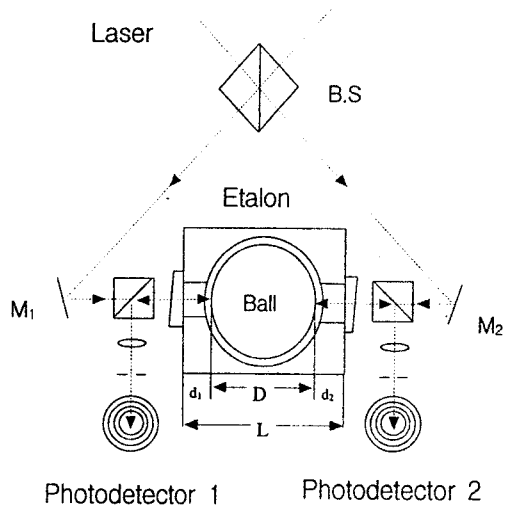


Fig. 1. Schematic diagram of interferometer for diameter measurement of ball.

여기서, $\delta \phi$ 는 에탈론의 이동거리 변화에 대한 간섭무늬의 위상변화이며, N_1 과 N_2 는 간격 d_1 , d_2 에 대한 간섭차수의 정수부이고, ϵ_1 과 ϵ_2 는 소수부이다. 각각의 간섭무늬는 중심의 다수의 원형간섭무늬를 갖게 되고, 그 중심부에서 빛의 세기변화 I_1 , I_2 는 식 (3) 및 식 (4)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$I_1 = A_1 [1 - \cos(2\pi F_1)] \tag{5}$$

$$= A_1 (1 - \cos[2\pi(\delta \phi - \epsilon_1)])$$

$$I_2 = A_2 [1 - \cos(2\pi F_2)] \tag{6}$$

$$= A_2 (1 - \cos[2\pi(\delta \phi + \epsilon_2)])$$

여기서, A_1 , A_2 는 간섭무늬신호 진폭이다. 식 (5) 및 식 (6)으로부터 주기적인 신호인 I_1 와 I_2 사이의 위상차($\Delta \phi$)는 $\Delta \phi = \epsilon_1 + \epsilon_2$ 이며, 식 (2)의 $d=d_1+d_2$ 를 두 간섭무늬의 위상차로부터 구할 수 있게 된다. 위상차 측정은 두 개의 광검출기에 맺힌 신호크기를 순차적으로 비교하는 상관계수법(correlation coefficient method)을 사용한다. Fig. 2에서 신호1(- · -)은 광검출기 1에서 얻어진 신호이며, 신호2(- · -)는 광검출기 2에서 얻어진 신호이고, Corr.(- · -)는 신호1과 신호2의 상관계수를 나타낸 것으로 다음과 같이 구하였다.

$$fr(j) = \frac{\sum_{k=1}^{\delta n} [f_1(k) \cdot f_2(m)]}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\delta n} f_1^2(k)} \cdot \sqrt{\sum_{m=1}^{\delta n} f_2^2(m)}} \quad (7)$$

$k=i+n_l-1, m=i+j-1$

여기서 δn 은 신호1 과 신호2에서 각각 샘플링된 데이터 갯수이다. 광검출기 1에서 검출되는 신호에 대한 에탈론 위치함수1, $f_1(k)$ 의 중심부분에서 좌·우 같은 간격으로 $\delta n(n_2 - n_1)$ 개의 간섭무늬 세기 데이터를 취하고 $f_2(m)$ 에서 $i=1$ 부터 같은 수 δn 개의 데이터와 상관계수 $fr(1)$ 을 구한 다음 신호2의 데이터를 하나 이동하여 $i=2 \sim (\delta n+1)$ 에서의 상관계수 $fr(2)$ 를 구하여 전체의 상관계수의 함수 $fr(j)(j=1,2,3, \dots, n)$ 를 구할 수 있다. 그림에 보인바와 같이 $fr(j)$ 의 피크(peak) 위치는 두 신호가 동위상일 때 나타나는 것으로 주기성을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 상관계수의 그래프에서 첫 번째 보인 피크의 위치와 스캐닝(scanning) 하기전의 위치 즉 제로점까지의 거리가 두 신호의 위상차가 된다. 각 피크점과 에탈론의 평행이동 거리는 Fig. 2의 아래그림에 보인것과 같이 직선관계식을 가지고 있으므로 다음과 같이 1차식으로 fitting하여 y축의 절편으로부터 위상차 즉 ϵ 를 얻을 수 있다.

$$n = (1 - \epsilon) + Cx_n \quad (8)$$

여기서, n 은 왼쪽으로부터 x_n 의 위치(에탈론의 이동거리)에 있는 n 번째 피크이며, C 는 상수이다.

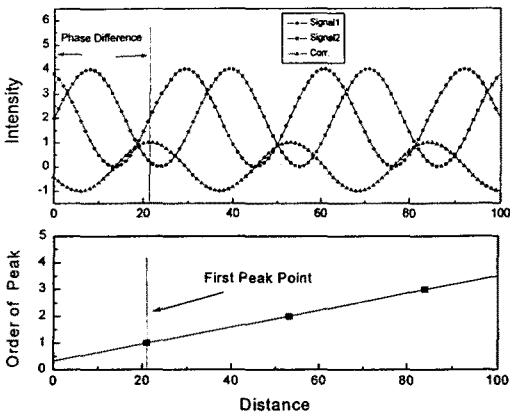


Fig. 2. Interference fringe signals and correlation coefficient peak point.

III. 시스템 구성

3.1 시스템 구성

구의 직경을 측정하기 위한 간섭장치는 광학적 시스템과 제어계 및 측정장치로 구성하였다. 광학적 시스템은 일반적인 간섭계와 마찬가지로 표준구가 설치된 에탈론의 양쪽에 레이저 빔을 입사시켜 구의 표면과 플레이트의 표면에서 반사된 빔의 광로차에 의하여 간섭무늬가 생기도록 하는 것이다.

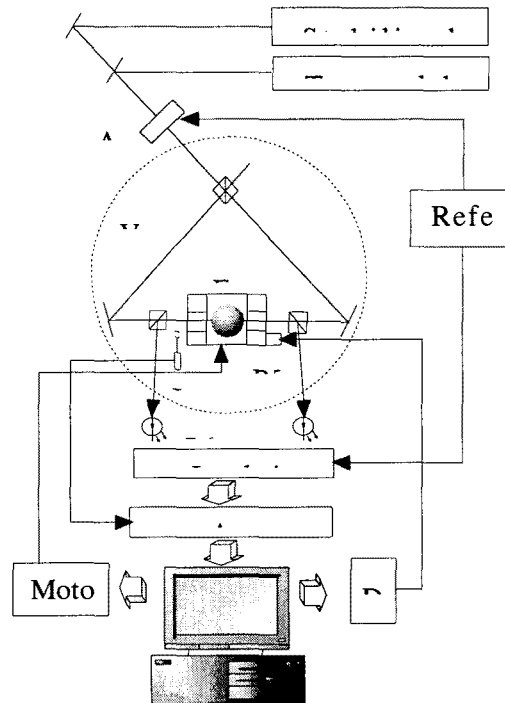


Fig. 3. Schematic diagram of interferometric system

Fig. 3은 간섭계 구성시스템을 보인 것이다. 그림에 보인바와 같이 광학적 시스템은 레이저, 에탈론, 표준구 설치대 그리고 에탈론 이동장치와 광검출기로 구성하였고, 제어계 및 측정장치로는 간섭무늬의 빛의 세기변화를 측정하기 위한 광음향변조기(AOM)와 압전소자(PZT) 그리고 록인-앰프와 μ -컴퓨터로 구성하였다. 본 측정에서 사용한 레이저는 3개 종모드의 2차맥놀이 신호를 이용하여 주파수 안정화된 레이저로서⁽⁹⁾국가길이 표준기로 사용하고 있는 요오드 안정화 헬륨-네온 레이저(KRIS-R701)를 사용하여 주파수와 안정도를 측정하였다. 그 결과 진공파장은 632.9913025 nm 이며,

안정도는 2×10^{-9} 이었다. 또한 간섭무늬 차수를 결정하기 위해서 4개의 파장을 얻을 수 있는 파장가변 헬륨-네온 레이저 (PMS Electro-Optics, model : P/N LSTP-1010, green(543 nm), yellow(594 nm), orange(612 nm), red(633 nm))를 사용하였다. 광음향변조기(AOM)는 레이저와 에탈론 사이에 설치하여 간섭무늬의 S/N 비를 높이도록 하고 변조주파수는 175 Hz를 사용하였다. 사용된 AOM의 RF 주파수는 80 MHz이며, 1차회절 빔의 회절효율이 95 %인 NEOS Technologies Inc. (model : N23080) 제품이다. 이의 제어 전원장치로는 NEOS Technologies Inc. (model : N21080-1AMVCD)사의 제품을 사용하였다. 광검출기로 감지된 간섭무늬의 신호는 록인-앰프(Stanford Research System, model : SR510, 530)로 증폭하고 A/D 변환기를 통해 μ -컴퓨터로 측정하였다. 에탈론의 이동을 위해 단일변형체(monolithic flexure)를 사용하고 압전소자(PZT)로 구동하였다.

3.2 에탈론

에탈론은 팽창계수가 2×10^{-8} 인 zerodur 블록을 Fig. 4와 같이 $130 \times 120 \times 70$ mm 크기로 제작하고, 빔이 통과하는 양쪽면에 직경이 3 cm이고 두께가 1 cm인 용융석영판을 부착하였다. 에탈론은 $1/20 \lambda$ 의 평면도를 가지도록 하고 용융석영판은 $1/20 \lambda$ 의 평면도로 양면을 가공하였으며 30'의 쉐기각을 주었다. 에탈론의 중앙에는 직경이 100 mm인 구멍을 내어 그림과 같이 표준구를 넣을 수 있도록 하였다. 에탈론은 단일 변형체 위에 설치하여 압전소자(PZT)로 이동할 수 있도록 하였다. 설치한 압전소자는 $5 \mu\text{m}/500 \text{ V}$ 의 전기 왜곡률을 가진 Piezomechanik GmbH사 제품이며, D/A 변환기 이용하여 μ -컴퓨터로 램프(Ramp)전기신호를 공급하였다. 변형체의 고정점은 두께와 반경을 0.3 mm와 2 mm로 하여 작은 힘으로도 변형이동이 가능토록 하고, 윗면에는 반경이 2 mm인 세 개의 반구 받침편을 설치하여 에탈론을 안정되게 놓을 수 있도록 하였다. 에탈론의 위치 조절은 Fig. 4에 보인바와 같이 세 개의 마이크로미터 헤드를 사용하였으며, 두 개는 좌·우로 조절하며 다른 하나는 위·아래로 조절할 수 있도록 하였다.

3.3 구 회전 및 로딩 장치

구 직경은 여러방향에서 등간격으로 측정하여 평균

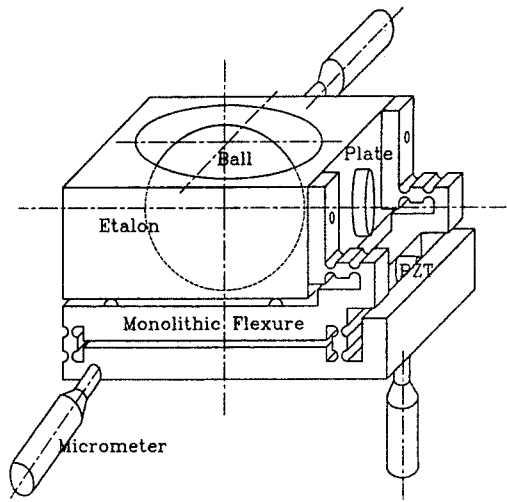


Fig. 4. Etalon and monolithic flexure.

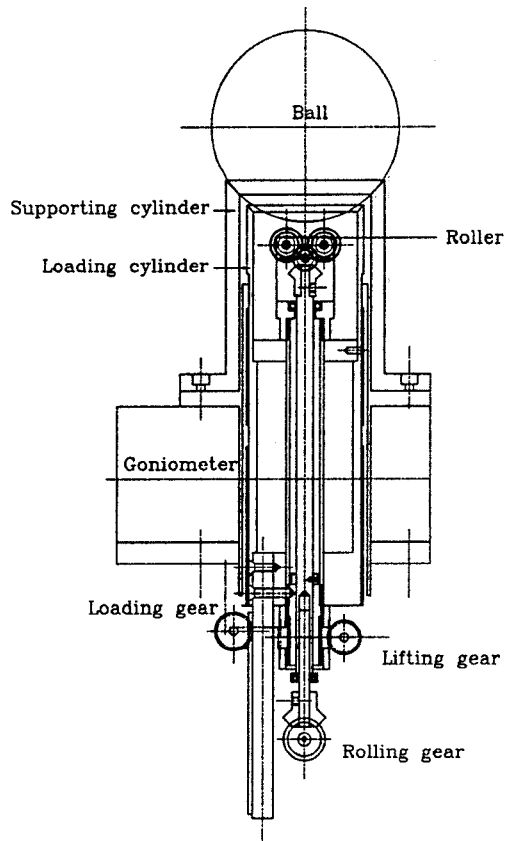


Fig. 5. Loading and rotating device.

값을 사용하여야 한다. Fig. 5는 구를 에탈론 안에 설치하고 측정 방향을 바꿀 수 있는 장치를 보인 것이다. 구의 설치는 로딩 기어를 구동하여 로딩(loading) 실린

더로 받아 각도계 위에 고정된 받침 실린더 위에 천천히 내려 놓도록 하였다. 구의 회전은 수평과 수직회전을 통하여 구의 측정방향을 선택할 수 있도록 하였다. 수평회전은 각도계를 이용하였고 사용된 각도계는 일본 시그마 광기기(주)의 제품(model : KSA120PM)이다. 수직회전은 4 개의 롤러를 사용하여 롤링 기어로 동시에 회전하도록 하였으며, lifting 기어는 구를 수직방향으로 회전할 때 4개의 롤러가 구 밑면에 접촉할 수 있도록 롤러 구동축을 1.5 cm 정도 위 또는 아래로 움직이게 하였다. 받침 실린더와 와 로딩 실린더 그리고 롤러는 알루미늄과 테프론으로 각각 제작하여 구 표면을 보호할 수 있도록 하였다.

IV. 구의 직경측정 및 결과

간섭계의 성능을 점검하기 위해 임의의 철제구에 대하여 1개의 측정방향만을 측정하였다. 측정에 사용된 철제구는 산업용으로서 밀도표준구로 사용되는 것은 아니다. 제작된 간섭계의 간섭무늬의 세기변화는 광검출기 1과 2에서 검출하여 록인-앰프로 증폭하여 μ -컴퓨터로 측정하였다. 간섭무늬 중심부의 세기변화는 압전소자로 에탈론을 이동하여 발생토록 하였다. 압전소자의 전압은 D/A 변환기로 1 V씩 증가하여 500 V까지 올렸다. 이 때 압전소자의 전기왜곡률은 $0.01 \mu\text{m}/\text{V}$ 정도이므로 500 V 변화시 $5 \mu\text{m}$ 이동하였다. 측정에 사용된 레이저는 파장이 633 nm인 주파수 안정화된 헬륨-네온 레이저(붉은색)와 파장이 594 nm인 헬륨-네온 레이저(노란색)이다. 노란색 레이저에 대해서는 2번 측정하여 평균값을 취하였다. 광검출기 1 및 2로 측정된 데이터는 식 (7)로 상관계수를 구한 후 최대점과 에탈론의 이동거리에 대하여 1차식으로 fitting 하였다. Etalon의 이동거리는 압전소자에 가한 전압(V)으로 대신하였다. 이의 1 차식으로부터 식 (8)에 의하여 간섭차수의 소수부(ω)를 구하였으며, 노란색 레이저에 대한 소수부(ω)는 2 번 측정한 값을 평균하여 사용하였다. Table 1은 측정결과를 보인 것이다.

석영판과 구 사이의 거리는 합치법⁽¹⁰⁾으로 구하였으며, 구의 직경은 78.1893544 mm로 나타났다.

$$\begin{aligned} \text{구직경} &= \text{에탈론 길이} - \text{구와 석영판 사이의 거리} \quad (9) \\ &= 123.6068375 - 45.4174831 \\ &= 78.1893544 \text{ mm} \end{aligned}$$

여기서, 에탈론 길이는 안정화된 헬륨-네온 레이저(붉

은색)로 측정된 값을 사용하였다. Table 1에 보인바와 같이 1차식으로 fitting 한 식의 y절편에 대한 오차는 0.018 ~ 0.03 order 범위에 있었으며, 헬륨-네온 레이저(노란색)로 반복 측정된 값의 차이는 0.013 order로 나타났다.

Table 1. Measurement results.

	Wavelength in vacuum (nm)	Linear fitting of correlation peak	Phase difference ($\omega = \omega_1 + \omega_2$)	Error
He-Ne stabilized laser (red)	632.9913025	$N = 0.07304 + 0.04854 V$	0.92696	0.018 order
Tunable He-Ne laser (yellow)	594.095945	$N_1 = 0.56694 + 0.05207 V$ $N_2 = 0.58003 + 0.05049 V$ Intercept of y axis(mean) = 0.56949	0.43051	0.03 order

V. 불확도 산출

구 직경의 측정 불확도는 크게 에탈론 길이의 표준 불확도와 구와 에탈론의 두 석영판 사이의 최적거리 표준불확도 합으로 구할 수 있으나 본 연구에서는 에탈론의 길이는 상수로 취급하고 구와 석영판 사이의 거리 측정에 대한 불확도만 고려하였다. 거리 측정에 대한 불확도는

- 1) 측정에 사용된 레이저의 파장불확도, U_λ
- 2) 위상측정 불확도, U_ϵ
- 3) 광검출기 위치에 대한 불확도, U_φ
- 4) 레이저 빔의 동축도에 대한 불확도, U_{co}

로 분류하여 다음과같이 합성불확도를 구하였다.⁽¹¹⁾

$$\begin{aligned} U_c^2 &= \sum_{i=0}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \\ &= \sum_{i=0}^N [c_i u(x_i)]^2 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $u(x_i)$ 는 입력량 x_i 의 표준불확도이고 c_i 는 감도 계수이다. Table 2는 각 불확도 요인을 보인 것이다.

Table 2. Uncertainty sources.

Uncertainty sources	Uncertainty
1) Laser wavelength in air	13 nm
2) Phase measurement	4.7 nm
3) Eccentric position of photodetector	4.6 nm
4) Alignment error of incident beam	0.4 nm
Uc	14.6 nm
U=2Uc (C.L.: 95.5 %)	29 nm

Table 2에서 레이저의 교정불확도는 다음식에 보인바와 같이 진공중 파장의 불확도와 공기에 대한 굴절률 보정불확도에 의해서 나타난다.

$$\text{레이저 파장}(\lambda) = \lambda_c / n \quad (11)$$

λ_c : 진공파장
 n : 공기 굴절률

사용된 레이저는 주파수 안정화된 헬륨-네온 레이저(붉은색)의 파장은 632.9913025 nm로 2×10^{-9} 의 주파수 안정도로 교정되어 파장의 불확도는 1.26×10^{-6} nm 이었으며, 굴절률 보정은 K. Brich이 계산한 표준상태의 굴절률 $n_s=1.00027131^{(12)}$ 을 적용하고 실제 실험실 환경변화에 대한 정밀보정은 하지 않았기 때문에 1 ppm(633 fm)의 굴절률 보정의 불확도를 가지게 된다. 따라서 레이저의 교정 불확도와 굴절률보정 불확도를 root sum square(RSS)로 결합하면 레이저 파장불확도는 633 fm이 된다. 이는 반너비가 316 fm인 직사각형 확률분포로 고려하면 길이측정의 불확도는

$$\begin{aligned} \text{길이측정불확도} &= \\ &= \text{반파장에 대한 표준불확도} \times \text{간섭무늬 개수} \quad (12) \\ &= (0.000316 \text{ nm}/2) / \sqrt{3} \times 143533.99876 \\ &= 13 \text{ nm} \end{aligned}$$

이다. 위상측정 불확도는 간섭신호의 상관계수에 대한 최대점과 예탈론 이동위치에 대하여 1차식으로 fitting 하였을 때 y 절편 또는 반복측정 오차로 나타나므로 Table 1에서 보인바와 같이 y 절편 또는 반복측정의 정밀도가 간섭차수의 0.03 order이므로 이를 95.5 %의 신뢰구간에서 확장인자(coverage factor)를 k=2를 가진 정상확률분포로 고려하면 위상측정 불확도는

$$\begin{aligned} \text{위상측정 불확도} &= (0.03 \text{ order} \times 633 \text{ nm} / 2) / 2 \quad (13) \\ &= 4.7 \text{ nm} \end{aligned}$$

이 된다. 광검출기 위치에 대한 불확도는 간섭무늬의 중심부와 검출기의 중심부와의 불일치 정도로 나타난다. 본 측정에서는 광검출기를 마이크로 미터를 이용하여 간섭무늬의 중심부에 오도록 조절하여 1/20 order의 오차로 설치하였다. 이는 반너비가 1/40 order인 직사각형 확률분포를 가진 것으로 고려하면 불확도는

$$\begin{aligned} \text{광검출기의 위치에 대한 불확도} &= (1/40 \text{ order} \times 633 \text{ nm}/2) / \sqrt{3} \quad (14) \\ &= 4.6 \text{ nm} \end{aligned}$$

이 된다. 빙동축도에 대한 오차는 구의 양쪽면에서 입사하는 두빔이 구의 직경축과 일치하지 않을 때 발생하는 오차이므로 직경을 측정하는 양쪽점이 구심점에 대하여 대칭이 되도록 광학적인 설치가 필요하다. 본 연구에서는 구의 최대직경을 측정하기 위해 빛이 잘 통과하는 zerodur 구를 설치하여 양쪽면으로 입사하는 빔이 구의 직경축을 지나도록 하고 빔이 반사경에 서로 같은 지점이 입사되도록 반사각을 조절하였다. 이때 반사경에 맺힌 두빔의 상의 위치가 약 0.1 mm 정도 서로 벗어나 있었다. 이 때 두 반사경 사이의 거리는 360 mm 정도 되므로 두빔의 동축도가 0.016° 정임을 알 수 있다. 이는 반너비가 0.008°인 직사각형 확률분포로 고려하면 빔의 동축도에 대한 불확도는

$$\begin{aligned} \text{빔의 동축도에 대한 불확도} &= 78 \text{ mm} - 78 \text{ mm} \times \cos 0.008^\circ \quad (15) \\ &= 0.4 \text{ nm} \end{aligned}$$

이다. 위 모든 불확도를 RSS로 결합하고 95.5 % 신뢰수준에서 확장인자 k=2를 적용하여 확장불확도(U)를 구하면

$$\begin{aligned} U &= 2Uc \quad (16) \\ &= 29 \text{ nm} \end{aligned}$$

가 된다. 이는 구의 직경을 지금까지 접촉식으로 측정하였을 때의 불확도 300 nm보다 10배 정도 향상된 것으로 밀도표준을 자체적으로 측정하여 1.1 ppm 수준으로 확립할 수 있게 되었다. 앞으로 측정오차 요인에 대한 불확도를 줄이는 연구를 통하여 밀도표준을 선진국

수준인 0.3 ppm까지도 향상할 수 있는 가능성이 예측된다.

VI 결 론

구직경 측정을 위한 간섭계를 제작하고 직경이 78 mm인 산업용 철제구의 직경을 예비적으로 측정한 결과 직경은 78.1893544 nm이며 95.5 %의 신뢰수준에서 29 nm의 불확도(k=2)를 얻었다. 이는 접촉식 측정방법보다 10 배 정도의 향상 된 것으로 밀도표준을 2 ppm에서 1.1 ppm으로 향상할 수 있음을 보였다.

참고문헌

[1] 장경호 등, "밀도표준구를 이용한 고체밀도의 정밀측정", Ungyong Mulli, Vol.8, No.6, 519-525 (1995).

[2] Shoichi Seino, "Interferometric Measurement of the Diameters of Fused Quartz Spheres", J. O. Appl. Phys. Vol.20, No.12, 2351-2357(1981).

[3] R. Balhorn, M. Kochsiek, A. Peuto and A. Sacconi, "Density Determination of Zerodur Spheres and Cubes by measuring the mass and the dimension-intercomparison between PTB and IMGC", PTB-Bericht, Me-64(1985).

[4] A. Sacconi, R. Panciera, and W. Pasin, Proceedings of the 8th International Progress in Precision Engineering Seminar, 111-114(1995).

[5] E. C. Morries, Progress Report on Sphere Diameter Measurements at NML, CCM/96-5 (1996).

[6] F. Spieweck et al, "A Computer-controlled Solid-density Measuring Apparatus", PTB-Mitteilungen 100 3/90, 169-173(1990).

[7] J. B. Saunders, "Ball and Cylinder Interferometer", J. O. R. NBS, Vol. 76C, 11-20(1972).

[8] K. Fujii et al, "Interferometric measurements of the diameters of a single-crystal silicon sphere", Rev. Sci. Inst., 63(11), 5320-5326(1992).

[9] H. S. Suh, T. H. Yoon, and M. S. Chung, "Frequency and power stabilization of a three longitudinal mode He-Ne laser using secondary beat frequency", Appl. Phys. Lett., Vol.63, No.15, 2027-2029(1993).

[10] 정낙삼, 등, "측정불확도 표현 지침", KRISS-98-96-SP(1998).

[11] K. P. Brich, "The results of comparison between calculated and measured values of the refractive index of air", J. O. Phys. E, Vol.21, 694-695(1988).

著 者 紹 介



서 호 성
 1956년 8월 29일생.
 1980년 영남대 물리학과 졸업(학사) 1982년 경북대 물리학과 졸업(석사) 1994년 영남대 물리학과 졸업(박사) 현재 한국표준과학연구원 길이그룹 그룹장



강 시 홍
 1959년 6월 5일생.
 1983년 영남대 기계공학과 졸업(학사) 1995년 충남대 기계공학과 졸업(석사) 현재 한국표준과학연구원 공작그룹 선임연구원

장 경 호
 『센서학회지 제4권 제3호』 논문95-4-3-02 p.9 참조
 현재 한국표준과학연구원 책임연구원

이 용 재
 『센서학회지 제4권 제3호』 논문95-4-3-02 p.9 참조
 현재 한국표준과학연구원 선임연구원

도 진 열
 현재 한국표준과학연구원 책임연구원