

Homodyne 간섭계에서의 비선형성 측정과 보정

김종윤*, 엄태봉**, 정규원***, 최태영****, 이건희****

Measurement and Compensation of Nonlinearity in Homodyne Interferometer

Jong Yun Kim*, Tae Bong Eom**, Kyu Won Jeong***, Tae Young Choi****, and Keon Hee Lee****

ABSTRACT

The nonlinearity of a laser interferometer usually ranges from sub-nanometer to several nanometers. This nonlinearity, which has periodic characteristics, limits the accuracy of the interferometer at the sub-nanometer level. The nonlinearity error of the one-frequency homodyne interferometer with quadrature fringe detection results from a number of factors including polarization mixing by imperfect optical elements, unequal gain of photo detectors, lack of quadrature between two signals and misalignment. In this paper, we described a method for measuring and compensating the nonlinearity of homodyne interferometer using the elliptical fitting technique with least-square method. Experimental results demonstrate that ± 3.5 nm nonlinearity can be reduced to ± 0.2 nm level.

Key Words : Laser interferometer(레이저 간섭계), Nonlinearity(비선형성), Homodyne interferometer(호모다인 간섭계), Elliptical fitting(타원곡선맞춤), Least-square method(최소자승법)

1. 서론

레이저를 광원으로 한 간섭계는 측정 단위인 파장이 미터에 직접 소급되고 높은 가간섭에 의한 긴 측정거리, 높은 주파수 안정도에 의한 좋은 정밀 정확도를 얻을 수 있기 때문에 정밀 길이 측정장치에 널리 사용되고 있다. 레이저 간섭계는 보통 수십 미터의 측정범위에서 A수준의 분해능을 갖고 있으며 10^{-7} 이상의 정확도를 얻고 있다. 레이저 간섭계는 단일 주파수의 광원을 사용하는 호모다인(homodyne)간섭계와 두 개의 주파수를 사용하는 헤테로다인(heterodyne)간섭계가 있다. 전자의 경우 고전적으로 가장 많이 사용된 방법으로 광원제작의 용이함, 높은 분해능, 신호처리의 간단함 때

문에 실험실 수준에서 쉽게 구현할 수 있다. 반면 간섭무늬의 세기를 신호로 사용하기 때문에 노이즈 및 정렬상태에 민감한 단점이 있다. 후자의 경우 도플러 천이(doppler shift)에 의한 주파수 변화를 이용하여 이동길이를 측정하기 때문에 호모다인 간섭계에서 문제가 된 노이즈 및 정렬상태에 덜 민감하나 신호처리가 복잡하고, 측정속도에 제약이 있으며, 2개의 직교한 주파수 성분을 갖는 레이저를 광원으로 사용하여야 하는 제약이 있다.

이러한 레이저 간섭계가 갖는 오차요인은 광원인 레이저 주파수의 불안정도, 측정시스템의 부정확에 의한 정렬오차, 공기 굴절률 보정에 따른 오차 및 진동 등이 있다.¹⁾ 최근 나노기술의 급격 발

* 2001년 3월 5일 접수

* 충북대학교 대학원 정밀기계공학과

** 한국표준과학연구원

*** 충북대학교 기계공학과

**** 충남대학교 대학원 수학과

달에 따라 나노미터 수준의 정밀 정확도를 갖는 길이 측정이 여러 분야에서 요구되고 있는데 이 경우 비선형성과 간섭계 자체의 노이즈가 중요한 요인이 되고 있다. 특히 짧은 측정범위에서 고 분해능과 절대적 측정 정확도를 요구할 때 간섭계에서 발생하는 비선형성에 의한 오차가 측정에서 가장 큰 제약으로 작용하고 있다.

광경로(optical path)가 한 주기(2π 위상)변함에 따라 발생하는 비선형성은 주기적인 특성을 갖고 있는데 이에 관한 연구는 헤테로다인 간섭계에서 처음 시작되었다.^[2] 호모다인 간섭계는 검출기 부분의 편광광속분리기(PBS)에서 선형편광 신호를 정확하게 분리하지 못하고 90° 직교하는 선형편광 성분이 일부 섞이는 편광혼합(polarizing mixing)에 의해 비선형성이 발생되는데 그 크기는 편광혼합비의 제곱(2차항)에 비례한다. 한편 헤테로다인 간섭계의 경우 광원의 두 주파수 성분이 서로 직교하지 않거나 불완전한 PBS 등의 원인으로 간섭계의 PBS에서 두 주파수 성분이 정확하게 분리되지 않는 주파수혼합(frequency mixing)에 의해 발생되는데 그 크기는 주파수혼합비에 비례하는 1차항의 위상오차를 갖게 되어 호모다인 보다 큰 비선형 오차가 있음이 보고되었다.^[3]

최근 헤테로다인 간섭계에서 광학적인 방법과 전자적인 방법을 적용하여 주파수혼합에 의한 1차항의 비선형 오차를 제거하는 연구가 진행되었다.^[4,5] 호모다인 간섭계의 경우 위에서 언급한 편광혼합이외에 이 간섭계가 신호검출로 이용하는 간섭무늬가 아날로그적인 특성을 갖기 때문에 레이저출력의 변화, 광학계의 정렬상태, 광검출기의 이득비의 차이, 광검출기 신호가 90° 위상차를 갖지 않는 등의 원인으로 또 다른 비선형성이 발생된다. 만일 비선형 오차가 없다면 즉, 이상적인 경우에 90° 위상차를 갖는 두 간섭무늬 신호의 리사주 그래프(Lissajous graph)는 원을 그릴 것이다. 그러나 비선형성 때문에 진원에서 찌그러진 타원이 형성된다.^[6,7]

본 연구에서는 호모다인 간섭계에서의 비선형 오차요인을 이론적으로 분석하고 이 비선형성을 보정할 수 있는 방법으로 최소자승법(least square method)을 이용한 타원곡선맞춤(elliptical fitting)방법을 제시하였으며 이것을 실험적으로 호모다인 간섭계에 적용하여 비선형 오차를 축소하였다.

2. 비선형오차 요인 및 비선형성 보정

2.1 비선형오차 요인

일반적으로 가장 널리 사용되는 호모다인 방식의 편광 간섭계가 Fig. 1에 있다.

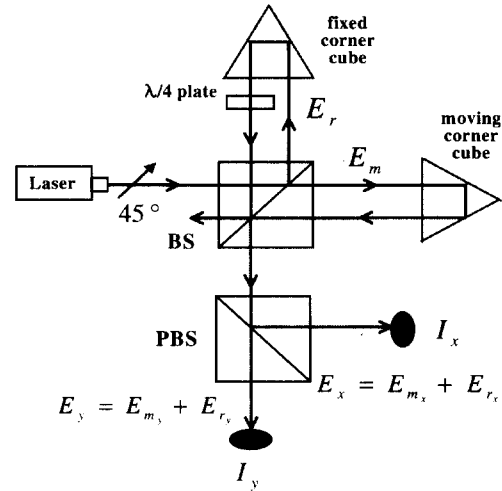


Fig. 1 Schematic diagram of homodyne interferometer

45° 방향으로 선형편광된 단일 주파수의 광속이 광속분리기(BS)에서 둘로 분리되어 고정코너큐브(fixed corner cube, 기준팔)와 이동코너큐브(moving corner cube, 측정팔)로 향한다. 두 팔로 진행하는 레이저 광속에 대한 전기장(electric field)의 크기는 식(1)로 표현된다.

$$\begin{aligned} E_r &= A \exp[i(\omega t + 2kl_r + \theta_r)] \\ E_m &= B \exp[i(\omega t + 2kl_m + \theta_m)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 l_r 과 l_m 은 BS와 코너큐브 사이의 거리, ω 는 레이저의 주파수, θ_r 과 θ_m 은 초기위상으로 "0"이라 가정한다. 이 두 빛은 각각 코너큐브에서 반사된 후 다시 BS에서 합쳐지면서 간섭되어 그 간섭신호의 세기가 광검출기(photodiode)에서 얻어진다. 고정코너큐브에서 반사된 빛은 $\lambda/4$ 판을 통과하면서 원형편광으로 바뀌는데 이것은 검출기의 두 신호 사이에 90° 의 위상차를 주기 위해 사용된다. BS에서 합쳐진 두 빛의 전기장의 크기는 $E_r + E_m$ 이 되고 이것은 PBS에서 둘로 분리되는

데 이 때 수직, 수평 선형편광 방향으로 분리된 빛에 대한 전기장의 크기는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 E_x &= E_{m_x} + E_{r_x} \\
 &= B_x \exp[i(\omega t + 2kl_m)] \\
 &\quad + A_x \exp[i(\omega t + 2kl_r)] \\
 E_y &= E_{m_y} + E_{r_y} \\
 &= B_y \exp[i(\omega t + 2kl_m)] \\
 &\quad + A_y \exp[i(\omega t + 2kl_r + \frac{\pi}{2})] \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서 x 는 PBS에서 반사된 성분, y 는 통과된 성분을 의미한다. 광검출기에서의 신호는 전기장의 제곱에 비례하기 때문에 광검출기의 출력은 식(3)으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 I_x &\propto (E_x)(E_x)^* \\
 &= B_x^2 + A_x^2 + 2A_x B_x \cos[2k(l_m - l_r)] \\
 I_y &\propto (E_y)(E_y)^* \\
 &= B_y^2 + A_y^2 + 2A_y B_y \cos[2k(l_m - l_r) - \frac{\pi}{2}] \quad (3)
 \end{aligned}$$

두 팔의 광경로차 ($l_m - l_r$)가 변하게 되면 두 광검출기의 출력 (I_x, I_y)은 90° 의 위상차를 갖는 정현파(sinusoidal wave)로 변하게 된다. 만일 레이저 광속이 45° 로 선형편광 되어 있고, BS와 PBS가 빛을 같은 세기로 분리시켜 B_x, A_x, B_y, A_y 가 서로 같다고 가정하면 식(3)은 식(4)와 같이 간단하게 되어 두 신호의 리사주 그래프는 원이 된다.

$$\begin{aligned}
 I_x &= I_o + a \cos \varphi \\
 I_y &= I_o + a \sin \varphi \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서 φ 는 $2(l_m - l_r)$ 이 λ 만큼 변할 때 한 주기 (2π)변하는 위상값이다. 그러나 실제의 경우 BS나 PBS에서 분리되는 비율이 틀리고, 위상이 정확하게 90° 로 분리되지 않는다. 또한 광소자의 DC오프셋이나 이득이 서로 같지 않기 때문에 실제의 신호는 일반적으로 타원식이 된다.

$$\begin{aligned}
 I_x &= I_{x_o} + a \cos(\varphi + \delta) \\
 I_y &= I_{y_o} + b \sin \varphi \quad (5)
 \end{aligned}$$

여기서 I_{x_o} 와 I_{y_o} 는 간섭무늬의 DC성분이고 a

와 b 는 간섭신호의 진폭으로 거의 변하지 않는 상수이며, δ 는 두 신호가 90° 차이를 갖지 않는 정도이다. 한편 PBS가 불완전하거나 정렬이 좋지 못할 때 다른 편광성분이 누설(cross talk)될 수 있다. 누설된 비율(cross talk ratio)을 p 라고 하면 다른 편광성분이 누설된 전기장의 x, y 성분들은 식(6)과 같다. 여기서 p 는 보통 0.01에서 0.001 사이의 작은 양이기 때문에 식(6)에서 앞 항에 곱해지는 계수 $(1-p)$ 를 편의상 1로 하였다.

$$\begin{aligned}
 E_{m_x} &= E_{m_x} + pE_{m_y} \\
 &= B_x \exp[i(\omega t + 2kl_m)] \\
 &\quad + pB_y \exp[i(\omega t + 2kl_m)] \\
 E_{m_y} &= E_{m_y} + pE_{m_x} \\
 &= B_y \exp[i(\omega t + 2kl_m)] \\
 &\quad + pB_x \exp[i(\omega t + 2kl_m)] \\
 E_{r_x} &= E_{r_x} + pE_{r_y} \\
 &= A_x \exp[i(\omega t + 2kl_r)] \\
 &\quad + pA_y \exp[i(\omega t + 2kl_r + \frac{\pi}{2})] \\
 E_{r_y} &= E_{r_y} + pE_{r_x} \\
 &= A_y \exp[i(\omega t + 2kl_r + \frac{\pi}{2})] \\
 &\quad + pA_x \exp[i(\omega t + 2kl_r)] \quad (6)
 \end{aligned}$$

식을 간단히 하기 위해 $\beta_y = pB_y, \alpha_y = pA_y, \beta_x = pB_x, \alpha_x = pA_x$ 로 놓으면 PBS에서 다른 편광성분이 누설된 상태로 광검출기로 입사되는 두 전기장의 크기는 식(7)이 된다.

$$\begin{aligned}
 E_x &= E_{m_x} + E_{r_x} \\
 &= (B_x + \beta_y) \exp[i(\omega t + 2kl_m)] \\
 &\quad + A_x \exp[i(\omega t + 2kl_r)] \\
 &\quad + \alpha_y \exp[i(\omega t + 2kl_r + \frac{\pi}{2})] \\
 E_y &= E_{m_y} + E_{r_y} \\
 &= (B_y + \beta_x) \exp[i(\omega t + 2kl_m)]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ A_y \exp[i(\omega t + 2kl_r + \frac{\pi}{2})] \\
 &+ \alpha_x \exp[i(\omega t + 2kl_r)] \quad (7)
 \end{aligned}$$

누설된 성분이 포함된 두 광검출기의 출력은 식(8)이 된다.

$$\begin{aligned}
 I_x &\propto (E_x)(E_x)^* \\
 &= B_x^2 + \beta_y^2 + A_x^2 + \alpha_x^2 \\
 &\quad + 2A_x B_x \cos[2k(l_m - l_r)] \\
 &\quad + 2\alpha_y \beta_y \sin[2k(l_m - l_r)] \\
 I_y &\propto (E_y)(E_y)^* \\
 &= B_y^2 + \beta_x^2 + A_y^2 + \alpha_y^2 \\
 &\quad + 2A_y B_y \cos[2k(l_m - l_r) - \frac{\pi}{2}] \\
 &\quad + 2\alpha_x \beta_x \cos[2k(l_m - l_r)] \quad (8)
 \end{aligned}$$

여기서 DC 성분인 $B_x^2 + \beta_y^2 + A_x^2 + \alpha_x^2$ 과 $B_y^2 + \beta_x^2 + A_y^2 + \alpha_y^2$ 을 I_{x_0} 와 I_{y_0} 로 놓고 $2A_x B_x$ 와 $2A_y B_y$ 를 a 와 b 로 놓으면 식(8)은 다음의 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_x &\propto I_{x_0} + a \cos[2k(l_m - l_r)] \\
 &\quad + 2\alpha_y \beta_y \sin[2k(l_m - l_r)] \\
 I_y &\propto I_{y_0} + b \cos[2k(l_m - l_r) - \frac{\pi}{2}] \\
 &\quad + 2\alpha_x \beta_x \cos[2k(l_m - l_r)] \quad (9)
 \end{aligned}$$

보다 간단하게 하기 위해 편광성분이 누설된 양인 $\alpha_x, \alpha_y, \beta_x, \beta_y$ 를 α 로 같다고 가정하고 광경로차에 관한 항 ($2k\{l_m - l_r\}$)을 위상항으로 바꾸면 즉 식(2)에서 검출기에서의 전기장 E_x 에 E_{m_x} 와 E_{r_x} , E_y 에 E_{m_y} 와 E_{r_y} 가 아주 작게 섞인 형태가 되므로 식(9)은 식(10)으로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_x &= I_{x_0} + a \cos(\varphi + \delta) + 2\alpha^2 \sin \varphi \\
 I_y &= I_{y_0} + b \sin \varphi + 2\alpha^2 \cos \varphi \quad (10)
 \end{aligned}$$

식(10)는 호모다인 간섭계에서 간섭무늬에 대한 일반적인 표현인데 식에서 볼 수 있듯이 편광혼합(α)에 의한 비선형성은 2차항의 작은 양이다. 그

리고 실제의 측정에 있어 편광혼합에 의한 비선형성보다 90° 위상차를 갖는 두 신호를 얻는데 있어 1)간섭계의 두 팔(optical arm)로 분리된 두 빛의 세기 차이 2)간섭무늬 검출기의 이득(gain)의 차이 3) 두 신호사이의 위상차가 90° 에서 벗어남 4)전자회로의 오프셋(offset) 및 이득의 차이 등에 의한 비선형성이 더욱 문제가 된다.

2.2 비선형성 보정

일반적으로 90° 위상차를 갖는 간섭계에서의 위상은 식(4)와 같은 원으로 가정하여 식(11)로 계산한다.

$$\varphi = \tan^{-1}[(I_y - I_0)/(I_x - I_0)] \quad (11)$$

그러나 이 식은 식(5)와 식(10)에서 볼 수 있듯이 비선형성을 내포하고 있는 일반 간섭계에서는 적용할 수 없고 타원곡선맞춤을 하여야 비선형 오차가 어느 정도 제거된다. 식(5)를 직교 좌표계에서 일반적인 타원식으로 다시 쓰면 식(12)가 된다.

$$x^2 + Bx + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (12)$$

여기서 B, C, D, E, F는 타원의 모양과 위치를 결정하는 상수로 식(5)의 I_{x_0} , I_{y_0} , a , b , δ 는 상수 B, C, D, E, F로 표시될 수 있다. 간섭 무늬 신호인 I_x , I_y 에 해당되는 데이터(x_i , y_i)를 일반적인 타원식(12)에 적용하여 최소자승법으로 곡선맞춤을 함으로써 즉, 모든 데이터 쌍(x_i , y_i)와 타원 사이의 거리의 제곱의 합이 최소가 되는 조건을 적용하여 B, C, D, E, F 값을 구할 수 있고, 다시 식(5)의 계수 I_{x_0} , I_{y_0} , a , b , δ 를 정하게 된다. 따라서 타원곡선맞춤에 의한 위상은 식(11)이 아닌 식(5)에서 유도된 아래의 식(13)에서 구할 수 있게 된다.

$$\varphi = \tan^{-1}[\cos \delta / \{\sin \delta + \frac{b}{a}(\frac{I_x - I_{x_0}}{I_y - I_{y_0}})\}] \quad (13)$$

식(13)에 의해 위상을 구하게 되면 그 위상변화에 해당하는 길이변화(ΔL)는 광원으로 쓰인 레이저의 반파장($\lambda/2$)을 곱하여 구할 수 있다.

$$\Delta L = (\frac{\Delta \varphi}{2\pi})(\frac{\lambda}{2}) \quad (14)$$

여기서 $\Delta \varphi$ 는 시작점으로부터 누적된 위상차를 의미한다.

3. 실험 장치 및 방법

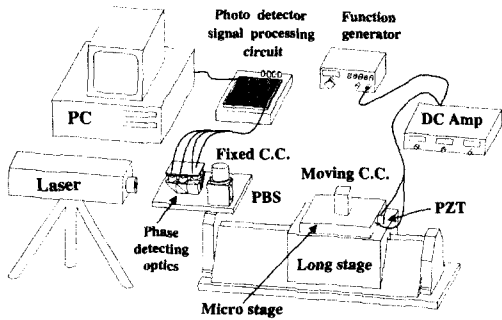


Fig. 2 Experimental setup

Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다. 광원은 Hewlett-Packard사의 He-Ne레이저(HP 5518)를 사용하였고 호모다인 간섭계의 광경로를 변화시키기 위해 PZT(Piezo transducer)로 구동되는 micro stage와 DC motor로 구동되는 long stage를 사용하였다. Fig.3은 호모다인 간섭계의 사진과 광경로를 나타낸 그림이다.

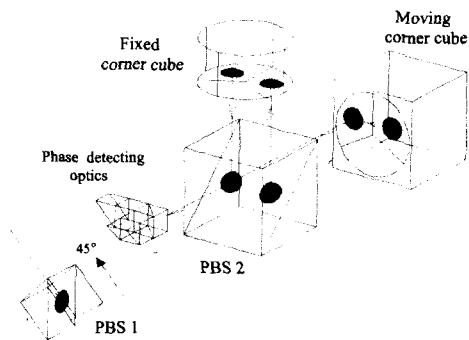


Fig. 3 Configuration of homodyne interferometer

주파수가 안정화된 두 주파수 성분중 단일 주파수 성분만 분리된 후 45° 로 놓인 PBS1에 의해서 45° 로 선형 편광된 성분만 투과하여 간섭계로 입사된다. 이 빛은 PBS2에서 수직·수평편광성분으로 분리된 후 각각의 코너큐브에서 반사된 후 다시 PBS2에서 합해져 간섭된 후 광검출기에 입사된다. Fig. 4는 광검출기로 4개의 90° 위상차를 갖는 간섭무늬를 생성하기 위한 광학계이다.

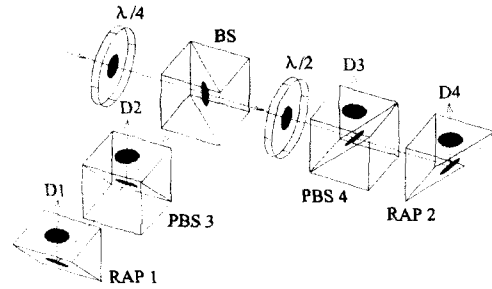


Fig. 4 Optical configuration for obtaining the phase quadrature signals

입사된 두 편광성분은 45° 로 놓인 $\lambda/4$ 판에 의해서 서로 반대방향으로 회전하는 두 원형편광이 된 후 BS에서 반씩 분리된다. PBS3에서 간섭신호의 수직성분은 반사되고 볼록렌즈에 의해 집광된 후 광검출기 D_2 에 의해 검출되고, 수평성분은 투과되어 직각프리즘(RAP₁)에서 반사되고 볼록렌즈를 거친 후 광검출기 D_1 에서 간섭무늬가 검출된다. BS를 통과한 빛은 22.5° 로 놓인 $\lambda/2$ 판에 의해 45° 회전되어 PBS4에 입사된다. 이 빛은 PBS4에서 수직·수평성분으로 분리된 후 광검출기 D_3 , D_4 에서 각각 검출된다. 그런데 이 빛은 $\lambda/2$ 판에 의해 45° 회전된 상태이기 때문에 원래의 간섭무늬의 편광에서 볼 경우 시계방향, 반시계 방향으로 각각 45° 틀어진 편광 성분을 통과하거나 투과시킨다. 따라서 D_1 과 D_2 , D_3 과 D_4 사이는 180° 위상차가 생기고, D_1 과 D_3 , D_2 와 D_4 사이는 90° 의 위상차가 생겨 $D_1 \sim D_4$ 사이의 출력은 (15)식으로 표현된다. 이 실험에서 long stage의 축과 레이저의 축을 나란하게 하고 4개의 광검출기 출력 사이에 90° 의 위상차가 있도록 두 λ 판을 정확하게 정렬해야 한다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= a_1 + b_1 \cos \varphi \\
 I_4 &= a_4 + b_4 \cos(\varphi + 90^\circ + \delta_4) \\
 I_2 &= a_2 + b_2 \cos(\varphi + 180^\circ + \delta_2) \\
 I_3 &= a_3 + b_3 \cos(\varphi + 270^\circ + \delta_3) \quad (15)
 \end{aligned}$$

광검출기에서 검출된 4개 간섭신호는 이상적일 경우 DC offset과 진폭은 같고 위상차는 90° 가 되는 신호가 검출될 것이다. 그러나, 실제는 DC 성분과 진폭이 같지 않고 신호사이의 위상차는 90° 에서 벗어난 비선형성을 포함한다.

이 비선형성을 최소화하기 위해 광검출기의 신호인 I_1, I_2, I_3, I_4 의 진폭(b_1, b_2, b_3, b_4)이 같도록 전자적으로 조정한 뒤 180° 위상차를 갖는 I_1 과 I_2, I_3 와 I_4 를 차동증폭하여 DC성분을 제거한다. 이와 같은 방법으로 얻어진 두 개의 신호는 I_1, I_2, I_3, I_4 와 비교해 볼 때 DC offset은 거의 제거된 식(5)와 같은 sin과 cos의 신호가 되는데 이 두 신호의 리사주 그래프가 이상적인 원에 가깝게 전자장치로 조정한다. 그러나 이 신호들 역시 증폭되는 비율이 같지 않고 위상이 정확히 90° 가 되지 않는 비선형성 때문에 찌그러진 타원이 형성된다.

레이저출력이 변하거나 정렬상태가 달라지면 식(15)에 있는 4신호의 DC offset과 진폭이 각각 변하게 된다. 따라서 DC offset이 제거되지 않은 신호를 이용하여 타원곡선맞춤을 할 경우 시간에 따라 변할 수 있으며 정렬상태에 영향을 많이 받는다. 그러나 위의 방법처럼 DC offset이 거의 없도록 전자적으로 처리한 후 보정을 하게 되면 경우 레이저의 출력이나 정렬상태의 변화에 덜 민감하게 된다.

4. 실험결과

다음의 Fig. 5는 micro stage의 PZT에 정현파를 가해 약 20μm의 광경로차를 연속적으로 발생시키면서 그때 광검출기에서 얻어진 4개 신호를 전자적으로 조정하여 얻어진 sin, cos 두 신호의 리사주 그래프이다. Fig.5 에서 보는 바와 같이 전자적으로 조정한 두 신호도 진폭이 완전히 일치하지 못하고, 위상편위(δ)가 발생함에 따라 약간 찌그러진 타원이 된다.

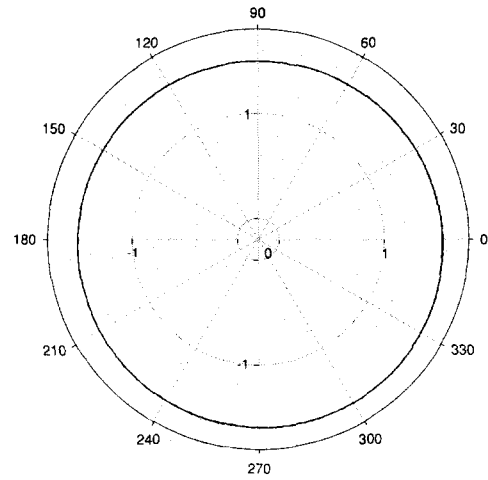


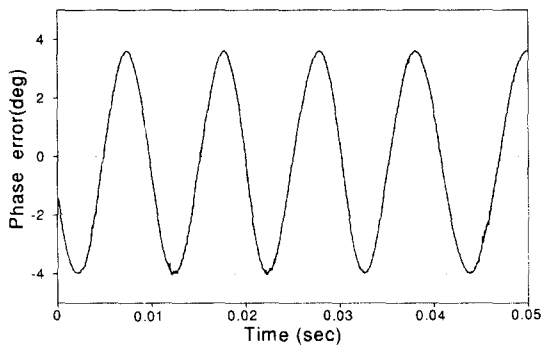
Fig. 5 Lissajous graph

Table 1은 Fig. 5의 데이터를 최소자승법을 이용하여 타원곡선맞춤하여 얻은 타원의 계수이다.

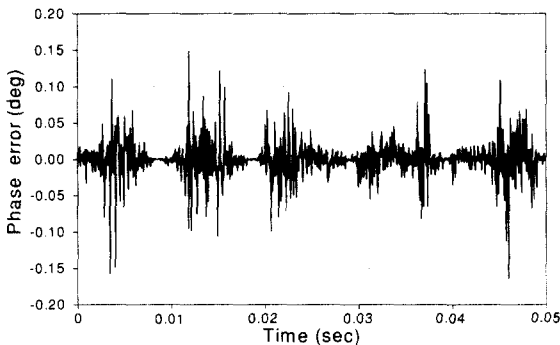
Table 1 Ellipse parameters

a	b	I_{x_0}	I_{y_0}	δ
1.5376	1.5465	0.0191	-0.0496	0.364°

표에서 볼 수 있듯이 두 신호의 진폭이 수 % 차이가 있으며 DC offset은 진폭의 4 % 미만으로 조정되었음을 알 수 있다. Fig. 6의 (a)는 타원곡선식에 의해 구한 위상 즉, 보정된 위상과 식(11)에 의한 보정되지 않은 위상과의 차이를 구한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 비선형오차는 위상변화($\lambda/2$)와 동일한 주기를 갖고 있다.(그림에서 수평축의 시간은 PZT에 전압을 가한 것으로 길이 변화에 같다.) 보정 전의 비선형성은 최대 ± 4° 정도로 거리 상으로는 약 ± 3.5 nm 정도이었다. Fig. 6의 (b)는 위의 타원곡선맞춤으로도 보정하지 못한 잔류 비선형성을 나타낸 그림으로 최대 ± 0.2° 의 위상 오차가 있는데 길이로는 약 ± 0.18 nm에 해당된다. 이것은 편광혼합에 의해 생기는 양인 식(10)에 있는 2차항과 노이즈에 의한 것이다. 이 실험으로 타원곡선맞춤에 의해 비선형성이 대략 1/20 정도 감소함을 알 수 있었다. 비선형성을 보다 정확하고 정량적으로 측정하기 위해서는 레이저 간섭계보다



(a) Nonlinearity before compensation



(b) Residual nonlinearity after compensation

Fig. 6 Nonlinearity of homodyne interferometer

분해능과 정확도가 우수한 X선 간섭계나 주파수 추적형 Fabry-Perot 간섭계를 사용하여야 하나 본 실험의 타원곡선맞춤 방법을 이용하여도 비선형성을 어느 정도 파악할 수 있다.^[8,9]

5. 결론

나노미터 이하의 정밀정확도가 요구되는 레이저 간섭계에서 비선형성 오차는 정확도 향상에 가장 큰 제약조건으로 작용하고 있다. 단일 주파수를 사용하는 호모다인 간섭계에서 비선형성 오차는 광검출기의 서로 다른 이득, 검출신호 사이의 90°와 다른 위상차, 잘못된 정렬상태, 혹은 편광혼합 등에서 발생된다. 본 연구에서는 호모다인 간섭계에서 발생하는 비선형성에 대한 오차를 최소화방법을 이용한 타원곡선맞춤방법으로 측정하고 보정하는 알고리즘을 개발하였으며 이것을 실험적으로 적용하였다. 레이저 출력변화 등과 같은 요인에 의한 오차를 최소화하기 위해 DC offset이 최소화되는 광

학계와 전자장치를 구성하여 비선형성을 측정·보정하였다. 이 간섭계의 비선형성은 $\pm 3.5\text{nm}$ 정도였으며 이것을 타원곡선맞춤 방법으로 보정하였을 경우 비선형성이 $\pm 0.18\text{nm}$ 로 약 1/20 정도 감소하였다. 이것은 주로 편광혼합과 노이즈에 의해 발생된 것으로 나노미터 수준의 정밀정확도를 요구하는 정밀길이측정에 충분하게 사용할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

1. Norman Bobraff, "Recent advances in displacement measuring interferometry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 4, pp. 907-926, 1993.
2. Quenelle R. C, "Nonlinearity in interferometer measurements," *Hewlett Packard J.*, Vol. 34, pp. 10, 1983.
3. Chien-ming Wu and Ching-shen Su, "Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7, pp. 62-68, 1996.
4. Hou W and Wilkening G, "Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers," *Precision Eng.* Vol. 14, pp. 91-98, 1992.
5. V. G. Badami and S. R. Patterson, "A frequency domain method for the measurement of nonlinearity in heterodyne interferometry," *Precision Eng.* Vol. 24, pp. 41-49, 2000.
6. Chien-ming Wu, Ching-shen Su and Gwo-Sheng Peng, "Correction of nonlinearity in one-frequency optical interferometry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7, pp. 520-524, 1996.
7. Frantisek Petru and Ondrej Cip, "Problems regarding linearity of data of a laser interferometer with a single-frequency laser," *Precision Eng.*, Vol. 23, pp. 39-50, 1999.
8. A. Yacoot and M. J. Downs, "The use of X-ray interferometry to investigate the linearity of the NPL Differential plane Mirror optical interferometer," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, pp. 1126-1130, 2000.
9. H. Haitjema, P. H. J. Schellerkens and S. F. C. L. wetzek, "Calibration of displacement sensors up to 300 μm with nanometre accuracy and direct traceability to a primary standard of length," *Metrologia*, Vol. 37, pp.

25-33, 2000.

10. 박윤창, 정경민, "Four-bucket 알고리즘을 이용한 레이저 간섭계," 한국정밀공학회지, 제16권, 10호, pp. 203-208, 1999.