

호모다인 간섭계에서 파장판에 의한 비선형 오차 해석 Analysis of Nonlinearity Error Caused by Wave Plate in Homodyne Interferometer

*안정호¹, 김재완², 김종안², #김수현¹
 *J. H. Ahn¹, J. W. Kim², J. A. Kim², #S. H. Kim¹(soohyun@kaist.ac.kr)
¹ 한국과학기술원, ² 한국표준과학연구원

Key words : Nonlinearity error, Homodyne interferometer, Wave plate

1. 서론

정밀한 길이 측정에 널리 사용되는 호모다인 간섭계(homodyne interferometer)는 광학계의 구성이 간단하고, 광검출기 부분의 구성도 복잡하지 않으면서 나노미터 이하의(sub-nanometer)의 높은 분해능(resolution)을 가지는 장점이 있다. 하지만 신호의 잡음(noise)이나 편광 누설(cross talk)성분에 의한 비선형성 오차(nonlinearity error)에 의해 그 성능이 저하된다. 편광 누설은 파장판(wave plate)의 불완정성 및 정렬 오차, 광선분할기(Beam splitter)의 불완정성, 편광판(polarizer)의 불완정성, 기타 광학계의 정렬오차에 기인한다. 본 연구에서는 비선형 오차를 감소시키기 위한 과정으로, 호모다인 간섭계에서의 파장판의 정렬 오차에 따른 비선형성 오차의 정도를 실험을 통해 얻어진 결과와 제안된 방법을 이용하여 계산된 이론 값과 비교하여 분석하여본다.

2. 호모다인 간섭계 구성

Fig. 1은 실험장치의 광학계 구성을 보여준다. 전체적인 간섭계는 기계적인 안정성을 위해 기구적인 마운트로 모두 연결되어 있다. 전체적인 광학계 구성은 크게 간섭계 부분과, 광검출부로 나누어 설명될 수 있다. 간섭계 부분은 $\lambda/4$ 파장판(QWP1, QWP2)이 45°로 정렬되어 있어, 45°로 편광된 빛이 PBS(Polarization Beam Splitter)를 투과 또는 반사한 후에 TM(Target Mirror) 또는 RM(Reference Mirror)에서 반사되어 QWP를 두 번째 통과함에 따라, PBS에서 빛이 반사 또는 투과된다. 이후 입사된 빛은 CC(Corner Cube)를 통과한 후 다시 같은 과정을 반복하며 진행하는 더블패스(double pass) 구조로 구성된다. 광검출부 부분(detection part)은 네 개의 포토다이오드(PD)가 있어서 위상이 각각 다른 네 개의 정현파(sine curve) 신호를 받아들일 수 있다. 반파장판(HWP)과 1/4 파장판(QWP3)은 간섭계에서 얻어지는 최종적인 두개의 신호가 90°의 위상차(quadrature)를 갖도록 하기 위해 각기 실험 좌표축에 대해 상대적으로 22.5°, 45°로 정렬되어 있다.

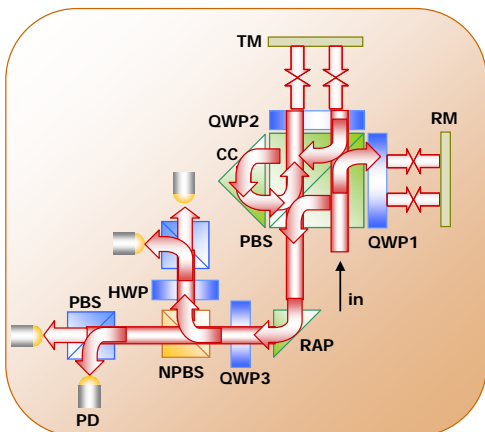


Fig. 1 Optical alignment of homodyne interferometer. Tm : Target mirror, Rm : reference mirror, QWP : quarter wave plate, RAP : right angle prism, PBS : polarization beam splitter, NPBS : non-polarization beam splitter, HWP : half wave plate, PD : photo diode

3. Jones Matrix 를 이용한 간섭계 모델링

비선형성 오차를 이론적으로 분석하기 위해, 시뮬레이션(simulation)을 수행하였다. 이 때 다음과 같은 가정을 하였고, 계산에 대한 값은 실제의 데이터에 근거한 것이다.

- 광원은 실험에서 사용된 광원의 사양과 같은 주파수 안정화된 헬륨-네온 레이저이며(frequency stabilized He-Ne laser)이며, 파장은 632.8 nm 이고, 약 1 %의 빛의 세기 변화(Intensity fluctuation)을 가진다.
- 파장판은 1/250 rad 의 파장지연 오차를 갖는다.
- 편광 광선 분할기(PBS)는 불완전하여 편광 누설(cross talk) 성분이 있다.

Jones Matrix 를 이용하여 편광 광선 분할기(PBS) 와 파장판(wave plate)을 표현하였다. 이와 같이 Jones Matrix 를 이용하면, 편리하게 네 개의 광 검출기에 도달하는 전기장(Electric Field)의 표현이 가능하다.^{[7],[8]}

$$T = \begin{bmatrix} 0.95 & 0 \\ 0 & 0.0001 \end{bmatrix}, \quad = \begin{bmatrix} 0.05 & 0 \\ 0 & 0.998 \end{bmatrix}$$

$$\left(\frac{\lambda}{2}\right)_{22.5^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -i - \epsilon/\sqrt{2} & -i \\ -i & i - \epsilon/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$\left(\frac{\lambda}{4}\right)_{45^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 - \epsilon/2 & -i(1 + \epsilon/2) \\ -i(1 + \epsilon/2) & 1 - \epsilon/2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

T 와 행렬은 PBS 의 편광성분에 따른 투과율(transmittance) 및 반사율(reflectance)을 Jones matrix 로 표현한 것이며, $(\lambda/4)$ 과 $(\lambda/2)$ 는 각각 QWP, HWP 의 Jones matrix 를 나타낸다. 식 (1)을 바탕으로 다음과 같이 간섭계 부분의 끝에서 전기장의 세기, T_E 를 수식으로 표현할 수 있다. 이 때 단순 반사계의 경우 편광 성분에 큰 영향을 주지 않으므로 생략하였다.

$$T_E = \left[T \begin{pmatrix} \lambda \\ 4 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \lambda \\ 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ 4 \end{pmatrix} T + \left(\begin{pmatrix} \lambda \\ 4 \end{pmatrix} \right)^2 T^2 \begin{pmatrix} \lambda \\ 4 \end{pmatrix} \right] E_i \quad (2)$$

Incident beam : $E_i = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$

코너큐브(CC)의 경우 공통된 광경로를 만드는데 기여하여 상대적인 편광 성분 변화에는 영향을 주지 않으며, 광선 분할기(NPBS) 또한 편광에 따른 반사투과도의 정도가 크게 차이가 나지 않으므로 단순히 $1/\sqrt{2}$ 값을 이용하였다. 포토다이오드(photo diode)에서 얻어지는 전기장을 표현해보면 다음과 같다

$$1 = \frac{1}{\sqrt{2}} T \begin{pmatrix} \lambda \\ 4 \end{pmatrix} T_E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_{1s} \end{bmatrix}$$

$$2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \lambda \\ 4 \end{pmatrix} T_E = \begin{bmatrix} E_2 \\ E_{2s} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$3 = \frac{1}{\sqrt{2}} T \begin{pmatrix} \lambda \\ 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ 4 \end{pmatrix} T_E = \begin{bmatrix} E_3 \\ E_{3s} \end{bmatrix}$$

$$4 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \lambda \\ 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ 4 \end{pmatrix} T_E = \begin{bmatrix} E_4 \\ E_{4s} \end{bmatrix}$$

(3)의 식을 바탕으로 각각의 포토 다이오드에서 검출되는 빛의 세기를, gain 값 $k_i(i=1,2,3,4)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현 가능하다. Subscript p, s 는 편광 성분을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 1 &= k_1(E_1 \cdot E_1^* + E_{1s} \cdot E_{1s}^*) \\
 2 &= k_2(E_2 \cdot E_2^* + E_{2s} \cdot E_{2s}^*) \\
 3 &= k_3(E_3 \cdot E_3^* + E_{3s} \cdot E_{3s}^*) \\
 4 &= k_4(E_4 \cdot E_4^* + E_{4s} \cdot E_{4s}^*)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

(4)의 식을 바탕으로, x 값을 다음과 같이 구할 수 있으며 x 는 서로 90° 의 위상차를 갖게 된다.

$$= 3 - 4, \quad x = 1 - 2
 \tag{5}$$

이와 같은 방법을 이용하여 이론적으로 비선형성 오차를 예상할 수 있고, 이를 실험을 통해서 얻은 결과와 비교하였다.

4. 호모다인 간섭계의 비선형성 오차

Fig. 2에서 앞의 이론적인 방법을 이용하여 계산된 비선형성 오차와 실험을 통해 얻어진 비선형성 오차를 비교하여 나타내었다. 실험값의 비선형성 오차는 저역통과 필터(Low pass filter)를 통과하여 신호의 잡음(noise)을 제거한 상태이다. 일반적으로 간섭계 신호에서 게인(gain)과 오프셋(offset)을 조절하였을 때, 약 3.5 nm(peak-to-peak)의 값을 보이고 있다. 실제 실험 값이 이론 값보다 약간 크며, 이는 파장판 정렬의 오차 및 전자회로에서의 게인(gain)과 오프셋(offset)에 기인된 것으로 판단된다.

이러한 비선형성 오차의 경우 파장판의 정렬 오차에 의한 영향은 이미 논의한 바 있다.¹⁾ 파장판의 정렬오차에 의한 비선형성 오차의 크기를 살펴볼 때, 가장 큰 영향을 미치는 부분은 광검출기 부분의 반파장판(HWP)이다. 0.5° 의 정렬오차에 의해 0.2 nm 이상 비선형성 오차가 증가함을 보였다.

따라서 실험적으로 이를 증명하기 위해 미세 각도의 회전기 가능토록 설계된 광학계 마운트를 이용하여 HWP 를 약 0.5° 의 각도 분해능으로 회전시키며 비선형성 오차의 크기를 관찰하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 정렬오차가 없을 때는 비선형성 오차가 최소를 나타내고 있으며(3.5nm, peak-to-peak), 각도 오차에 따라 비선형성 오차는 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 각도의 방향에 따라 약간의 비대칭성(asymmetric)을 보이고 있다. 실험 데이터와 이론 값은 거의 같은 경향을 보이나, 앞서 언급했던 이유들로 인해 약간의 차이를 보이고 있다.

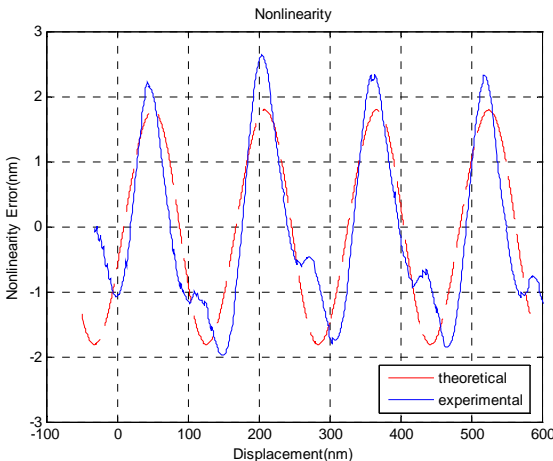


Fig. 2 Nonlinearity error acquired by theoretical and experimental method

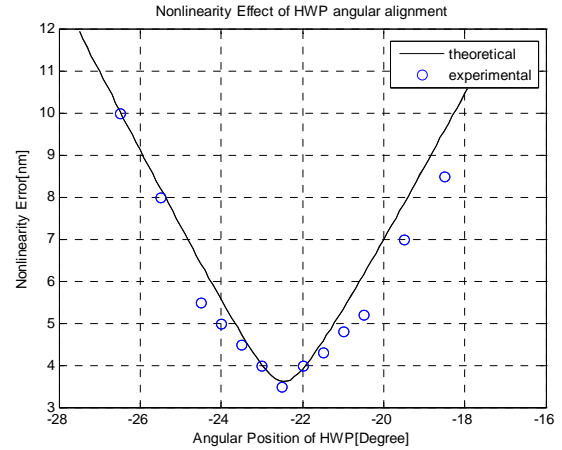


Fig. 3 Nonlinearity error caused by alignment error of Half Wave Plate(HWP)

4. 결론

지금까지 호모다인 간섭계의 구성 및 비선형성 오차의 이론적인 분석, 그리고 실험을 통해 얻은 데이터를 비교하여 파장판에 의한 비선형성 오차의 크기를 예상하고 검증할 수 있었다. 보상법이 적용되지 않았을 경우 비선형성 오차는 결코 무시할 수 없을 만큼 크다는 것을 알 수 있었으며, 따라서 앞으로 이를 보상하기 위한 보상법에 대한 연구가 필요함을 알 수 있다. 추후 이에 대한 보상법을 제안함으로써, 호모다인 간섭계의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. P.L.M. Heydemann, "Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers," Appl. Opt. 20, 3382-3384 (1981)
2. Norman Bobroff, "Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity", Applied Optics, Vol. 26, No. 13, 2676-2682(1987)
3. K.P.Birch, "Optical fringe subdivision with nanometric accuracy," Precis. Eng. 12, 195-198 (1990)
4. C.-M. Wu and C.-S. Su, "Nonlinearity in measurement of length by optical interferometry," Meas. Sci. Technol. 7, 62-68 (1996)
5. T.B.Eom, J.Y.Kim, and K.Jeong, "The dynamic compensation of nonlinearity in a homodyne laser interferometer," Meas. Sci. Technol. 12, 1734-1738 (2001)
6. Gaoliang Dai, "Improving the performance of interferometers in metrological scanning probe microscope," Meas. Sci. Technol. 15, 444-450 (2004)
7. Taeho Keem, "Removing nonlinearity of a homodyne interferometer by adjusting the gains of its quadrature detector systems," Appl. Opt. 43, 2443-2448, (2004)
8. Taeho Keem, "Simple, real-time method for removing the cyclic error of a homodyne interferometer with a quadrature detector system," Appl. Opt. 44, 3492-3498, (2005)
9. Jeongho Ahn, Jong-ahn Kim, Yoonkeun Kwak, SooHyun Kim, "Analysis on Nonlinearity Error in Compact Homodyne Interferometer Module", KSPE 2006년도 추계학술대회 논문집