

# 삼차원 좌표 측정을 위한 부피 간섭계의 오차분석 및 성능평가

이혁교(한국과학기술원 기계공학과), 주지영\*, 김승우

## Error analysis and Performance test of the Volumetric interferometer for Absolute distance measurement

H. G. Rhee(Mechanical Eng. Dept. KAIST), J. Y. Chu\*, S. W. Kim

### ABSTRACT

In this paper, we accomplish uncertainty evaluation and performance test of the volumetric interferometer using two spherical wavefronts emitted from the ends of two single mode fibers. We verify that the volumetric interferometer has the volume uncertainty of 690 nm through the error analysis and it has the resolution of 0.1  $\mu\text{m}$  for x axis which is the same order of repeatability for x axis. Also, we obtain the systematic error of 1  $\mu\text{m}$  for  $60 \times 60 \times 20 \text{ mm}^3$  working volume using self-calibration with an artifact plate.

**Key Words** : Volumetric interferometer(부피 간섭계), Phase shifting(위상천이), Uncertainty evaluation(불확도 계산), Self-calibration(자가보정)

### 1. 서론

삼차원 공간에서  $2\pi$ -모호성( $2\pi$ -ambiguity)의 제약을 받지 않고 절대거리, 혹은 절대좌표를 측정하는 방법에 대해서 그간 많은 연구가 이루어져왔다. 간섭계를 이용한 방법으로는 경사조사(Grazing incidence) 간섭계<sup>[1]</sup>, 2 파장(Two-wavelength) 간섭계<sup>[2]</sup>, 백색광 간섭계<sup>[3]</sup> 등이 있다. 하지만 이 간섭계들은 현재 산업계에서 요구하고 있는 수백 mm 공간에서 1  $\mu\text{m}$  이하의 정밀도로 측정하기엔 무리가 있다. 다중파장(Multiple-wavelength) 간섭계<sup>[4]</sup>의 경우 가장 부합되는 성능을 보이고 있지만, 아직 일반적인 헤테로다인(Heterodyne) 간섭계가 갖는 정밀도에 미치지 못하고 있다. 또 다른 방법으로, 절대거리를 직접 측정하지는 않지만 기하학적 모델을 이용해 절대거리를 계산하는 멀티래더레이션(multilateration)도 현재 연구중이다<sup>[5]</sup>.

삼차원 공간에서 절대거리를 측정하는 방법으로, 부피 간섭계(Volumetric interferometer)가 제안되었다<sup>[6,7]</sup>. 이 간섭계는 Fig. 1 과 같이 공간상의  $(x_1, y_1, z_1)$ 과  $(x_2, y_2, z_2)$  좌표에 위치한 두개의 단일모드 광섬유를 이용해서 구면파를 발생시키며, 광검출기 배열(Photo-detector array)에서 측정한 두 구면파

의 간섭무늬로부터 위상천이를 알고리즘을 통해 광위상을 구한다. 이 위상 정보에는 두 구면파의 중심좌표  $(x_1, y_1, z_1)$ 과  $(x_2, y_2, z_2)$ 에 대한 정보가 포함되어 있으므로, 비선형 최적화 방법을 통해 공간상의 좌표를 구할 수 있다<sup>[7]</sup>.

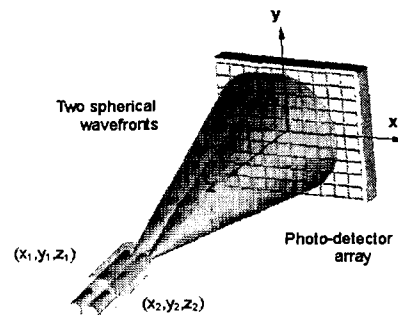


Fig. 1 Coordinates relationship of the volumetric interferometer

본 논문에서는 절대 좌표 측정을 위해 제안된 부피 간섭계의 오차원인을 분석하여 불확도를 계산하고, 성능평가를 위해 기존의 측정 방법들과 비교실험을 수행하였으며, 자가보정(Self-calibration)<sup>[8]</sup>을 통해 삼차원 공간상에서 간섭계가 갖는 계통오차

(Systematic error)를 추출했다.

## 2. 부피 간섭계의 원리 및 실험장치

점광원으로부터 자유공간으로 전파하는 구면파는 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 식(1)에서  $U$ 는 점광원의 세기(source strength),  $\lambda$ 는 파장,  $\phi$ 는 초기 위상,  $r$ 은 점광원으로부터 거리를 의미한다.

$$u = \frac{U}{r} \exp[-j(\frac{2\pi}{\lambda}r + \phi)] \quad (1)$$

Fig. 1과 같이 광검출기 배열의 중심을 원점으로 하는 가상의 절대 좌표계를 고려하면, 광섬유 1의 종단  $(x_1, y_1, z_1)$ 과 광섬유 2의 종단  $(x_2, y_2, z_2)$ 에서 출발해서 광검출기 배열 찰상면의  $k$ 번째 화소  $(x^k, y^k, z^k)$ 에 도달한 두개의 구면파의 간섭은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$I^k = |u_1 + u_2|^2 = \Pi^k + \Gamma^k \cos(\Phi^k + \Delta\phi)$$

$$\text{where } \Pi^k = \frac{U_1^2}{r_1^{k2}} + \frac{U_2^2}{r_2^{k2}}, \Gamma^k = \frac{2U_1U_2}{r_1^k r_2^k}, \quad (2)$$

$$\Phi^k = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1^k - r_2^k), \Delta\phi = (\phi_1 - \phi_2)$$

위 식에서 위상  $\Phi^k$ 는 식(3)과 같이 두 구면파 광원의 좌표  $(x_1, y_1, z_1)$ 과  $(x_2, y_2, z_2)$  6개 미지수의 함수임을 알 수 있다.

$$\Phi^k = \frac{2\pi}{\lambda}[r_1^k - r_2^k] \quad (3)$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} \{ [(x_1 - x^k)^2 + (y_1 - y^k)^2 + (z_1 - z^k)^2]^{1/2} - [(x_2 - x^k)^2 + (y_2 - y^k)^2 + (z_2 - z^k)^2]^{1/2} \}$$

식(2)의 간섭무늬에 위상천이 알고리즘을 적용하면  $\Phi^k + \Delta\phi$ 를 측정할 수 있고,  $\Delta\phi$ 는 광검출기 배열의 모든 화소에서 동일하므로, 미지수  $\Delta\phi$ 를 제거하기 위해 Fig. 1의 좌표계 원점을 이용해서 식(4)와 같이  $\Lambda^k$ 를 정의한다.

$$\Lambda^k = \frac{\lambda}{2\pi} [(\Phi^k + \Delta\phi) - (\Phi^0 + \Delta\phi)] = \frac{\lambda}{2\pi} [\Phi^k - \Phi^0] \quad (4)$$

식 (4)는 6 개 미지수  $(x_1, y_1, z_1)$ 과  $(x_2, y_2, z_2)$ 에 대해 비선형이므로 식 (5)와 같이 목적함수를 구성하고, 이 목적함수를 최소화하는 비선형 최적화(Nonlinear optimization)를 이용해서 미지수를 계산할 수 있다.<sup>[6,7]</sup> 식(5)의  $\hat{\Lambda}^k$ 는  $\Lambda^k$ 의 실제 측정값이다.

$$E = \sum_k [\frac{\lambda}{2\pi} (\Phi^k - \Phi^0) - \hat{\Lambda}^k]^2 \quad (5)$$

Fig. 2는 부피 간섭계의 모습을 보여준다. Fig. 2에서 안정화 레이저를 출발한 632.8 nm 파장의 광은 단일모드 광섬유를 통과해 커플러(coupler)로 입사된다. 입사광은 커플러 출력단에서 50:50의 광강도로 나뉘게 된다. 출력단의 광섬유는 약 10 m 길이로 튜브형 압전소자(PZT)에 감겨 있다. 한쪽은 위상천이를 위한 것이고 다른 한쪽은 광섬유 길이를 맞추기 위한 더미(dummy) 역할을 한다. 압전소자는 입력전압에 따라 튜브 반경 방향으로 팽창과 수축을 하며 이에 비례해서 압전소자에 감긴 광섬유의 길이도 팽창과 수축을 하여 위상천이가 가능하도록 한다. 광검출기(Single photo detector)는 두 광섬유 끝에서 반사해서 되돌아오는 4% 가량의 광을 검출하여 위상천이량을 탐지할 수 있다. 두 광섬유 종단은 중심사이 거리가 125  $\mu\text{m}$  가 되도록 지그(Jig)로 고정하고 광검출기 배열로는 640x480 CCD를 사용한다.

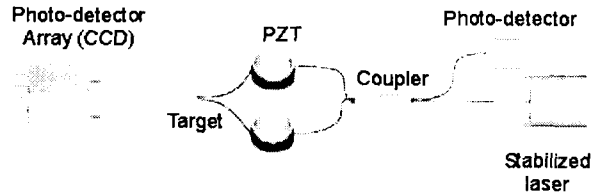


Fig. 2 System configuration of the volumetric interferometer

## 3. 오차분석 및 불확도 계산

부피 간섭계로 최종 결과인 절대좌표  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$ 를 구하는 과정에는 많은 오차들이 포함된다. 주요 오차원인으로 광원의 광량과 주파수 안정성, 광섬유 내부의 온도와 압력 변화, 공기굴절률 변화, 진동, 압전소자의 비선형성, 광검출기 배열의 비선형성, 전기적인 노이즈 등이 있다. 그리고 부피 간섭계에선 완전한 구면파를 가정하고 간섭무늬를 해석하므로 구면파의 진구도(Sphericity) 역시 오차원인이 된다. 또한 광검출기 배열의 각 화소들의 위치오차도 영향을 준다. 이상의 주요 오차원인들을 어느 단계에서 측정결과에 주로 영향을 주는지에 따라 구분하고 계산한 결과는 Table 1과 같다. 3열은 각 오차원인의 불확도를 나타내며 4열은 오차원인들이 좌표의 최종 불확도  $u_{x1}$ 에 미치는 영향을 보여준다. 매 단계마다 최악의 경우(Worst case)를 가정하고 값을 산출했다. 오차원인들에 의해 최종좌표에 나타나는 합성표준불확도는 120 mm 정육면체 공간상에서 x 축으로 416 nm, y, z 축으로 각각 550 nm, 9.7 nm 가 나왔다. 따라서 3 차원 공간에 대한 불확도(volume uncertainty)는 690 nm 가 나왔다. 모든 계산 과정은 ISO의 권고방법에 따라 수행되

었다<sup>[9]</sup>.

이 밖에도 좌표 측정 오차를 줄이기 위해선 두 구면파 사이의 간격을 가능한 줄여야 하며 큰 면적의 광검출기 배열을 사용하여야 한다.

Classification	Error sources	Uncertainty	Evaluation results
Fringe error $\eta_k$	Laser intensity stability	$u_k \leq 0.07\%$ of $\Pi$	107 nm
	High frequency vibration	$u_v$ is neglectable, because it only affects the fringe visibility.	Neglectable
	Temperature variation in the fiber	$u_T \leq 0.01K$	127 nm
	Low frequency pressure variation in the fiber	$u_p \leq 8 \times 10^{-4}$ rad.	0.756 nm
	Nonlinearity of fiber elongation & PZT	$u_{NL} \leq 0.15$ rad.	136 nm
	Electrical noise	$u_E \leq 0.7\%$ of $\Pi$	75.6 nm
	Detector nonlinearity	$u_D \leq 0.8\%$ of $\Pi$	348 nm
Model error $\eta_{sk}$	Sphericity of the spherical wave	$u_s \leq 1 \times 10^{-3}$ rad.	0.300 nm
	Laser frequency stability	$u_f \leq 1$ MHz	$9.75 \times 10^{-5}$ nm
	Air refractive index variation	$u_{na} \leq 10^{-7}$	$4.75 \times 10^{-3}$ nm
	Detector position error	$u_{DP} \leq 100$ nm	6.00 nm
Combined standard uncertainty, $u_{c1}$			416 nm

Table 1. Uncertainty evaluation result and individual influences of error sources

#### 4. 성능평가

실험결과, 부피 간섭계의 35 회 측정 반복능은 PV(peak-to-valley)값으로 x, y, z 축에 대해서 각각 97 nm, 50 nm, 9.7 nm 이고, 상용 헤테로다인 레이저와 한 축 비교실험에선 x 축으로 80 mm 행정에 대해 260 nm 의 차이(Deviation)를 보였다<sup>[7]</sup>. 이상의 실험에 추가해서 다음의 실험을 수행했다.

##### 4.1 분해능 검사

분해능을 검사하기 위해 Kleindiek 사의 Nanomotor<sup>[10]</sup>와 비교 측정했다. Nanomotor 는 x, y, z, 3 축에 대해 각각 최대 0.5 nm 분해능, 5 mm 구동범위를 가진다. 간섭계의 타겟(Target)을 Nanomotor 끝에 장착하고 Nanomotor 의 변위와 부피 간섭계로 측정한 좌표를 비교했다. Nanomotor 를 x 축 방향으로 100 nm 간격으로 구동했을 때도 간섭계에서 측정이 가능하였다. 하지만 이 값은 간섭계의 반복능과 같은 수준(Order)이므로 부피 간섭계의 분해능은

반복능으로부터 정해진다고 볼 수 있고, y 축과 z 축의 분해능에 대해서도 같은 결론을 내릴 수 있다.

#### 4.2 2 차원 스테이지와의 비교

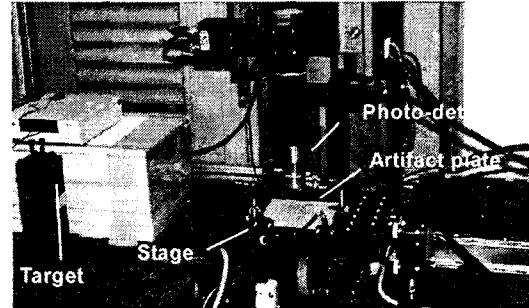


Fig. 3 Photographic view of the two-dimensional stage with the interferometer

2 차원 공간상에서의 비교 실험을 위해 Fig. 3 과 같이 와이어 본딩(Wire bonding)용으로 개발된 스테이지에 부피 간섭계를 장착하고 비교 실험했다. 스테이지는 63 mm x 63 mm 행정에 0.2  $\mu$ m 분해능의 2 축 광학식 스케일(Two-dimensional optical scale)을 가지고 있다. 간섭계에서 10 mm 간격으로 측정한 좌표와 광학식 스케일로 읽은 좌표를 비교한 결과 60 mm x 60 mm 전영역에 대해서 최대차는 1.31  $\mu$ m 정도가 나왔다. 여기에는 부피 간섭계의 오차 뿐 아니라 스케일의 오차, 정렬오차 등이 포함되어 있다.

#### 4.3 자가보정을 통한 시스템 오차 추출

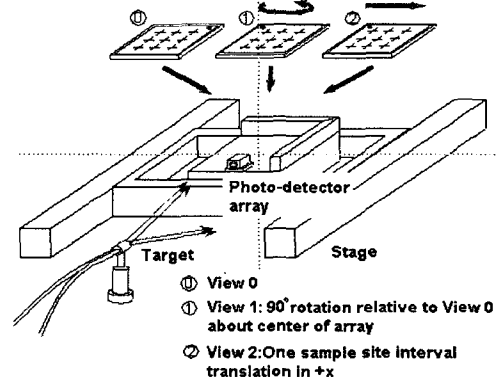


Fig. 4 Self-calibration method for extracting the systematic error from the interferometer

스케일의 오차나 정렬오차 등을 배제한 부피 간섭계만의 계통오차(Systematic error)를 구하기 위해 표준시편을 이용하여 자가보정(Self-calibration)을 수행했다<sup>[8]</sup>. 표준시편으로는 반도체 공정으로 만든 10 mm 간격의 7x7 격자를 사용했다. 자가보정은 Fig. 4 와 같이 시편의 격자 위치를 처음 한번 측정, 시

편을 90° 회전시켜 측정, 한 축 방향으로 병진시켜 측정함으로써 시편오차와 측정시스템의 계통오차를 분리한다. 그 결과 60 mm × 60 mm 영역에서 광학식 스케일은 1.5 μm 이하, 부피 간섭계는 1 μm 이하의 계통오차를 얻었다.

3 차원 공간상에서 부피 간섭계의 성능을 검증하기 위해 Fig. 3 에서 타겟의 y 축 방향 높이를 블록 게이지(Block gage)로 10 mm 씩 높이면서 3 평면에 대해 자가보정을 수행했다. 그 결과 60 mm × 60 mm × 20 mm 공간에서 광학식 스케일의 계통오차는 2.1 μm 이하, 부피 간섭계는 1 μm 이하를 얻었다.

Fig. 5 는 한 평면에서 측정된 간섭계의 계통오차와 시편오차를 보여준다. (a)의 시편오차에서 나타나는 S 형태의 왜곡이 (b)의 간섭계 계통오차에 정 반대 형상과 크기를 가지고 나타난다. 다른 평면에서도 동일한 현상이 관측됐다. 이런 왜곡은 시편오차가 자가보정 알고리즘을 거치면서 간섭계 오차로 전이 된 것으로 보인다. 결국 부피 간섭계만의 순수한 계통오차는 앞에서 구한 1 μm 보다 더 작을 것이다. 이론적으로 자가보정법은 시편오차와 계통오차를 완전하게 분리하지만 실제 측정에는 랜덤(Random)오차가 포함되므로 완전하게 분리해 낼 수 없다. 각각 다른 평면에서의 구한 시편오차를 비교해 보면 x 축으로 0.46 μm, y 축으로 0.37 μm의 차이가 나므로 측정에 있어서 이 정도의 랜덤오차가 존재함을 유추할 수 있다.

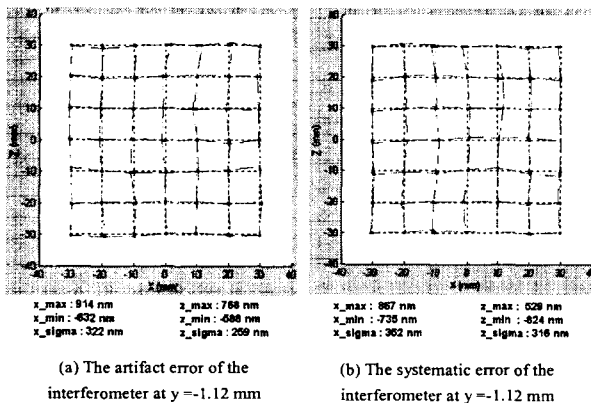


Fig. 5 Comparison of the artifact error and the systematic error of the interferometer

## 5. 결론

본 논문에서는 절대 좌표 측정을 위한 부피 간섭계의 오차원인을 분석하고 각 오차원인에 의한 불확도를 계산했다. 광검출기 배열의 비선형성, 압전소자의 비선형성, 광섬유 내부의 온도변화 등이 주요 오차원인으로 작용했으며 120 mm 정육면체 공

간에 대해서 690 nm의 불확도를 얻었다.

성능평가 실험에서 분해능은 간섭계의 반복능 수준으로 나왔고, 자가보정법을 통해 60 mm × 60 mm × 20 mm 공간상에서 간섭계의 계통오차(Systematic error)는 1 μm 이하를 얻었다. 여기에는 일부 시편 오차성분이 남아있는 것으로 생각되므로 실제 간섭계의 계통오차는 이보다 작을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. P. de Groot, "Grating interferometer for flatness testing," *Opt. Lett.*, Vol. 21, No. 3, pp. 228-230, 1996.
2. Z. Sodnik, E. Fischer, T. Ittner, and H. J. Tiziani, "Two-wavelength double heterodyne interferometry using a matched grating technique," *Appl. Opt.*, Vol. 30, No. 22, pp. 3139-3144, 1991.
3. T. Li, A. Wang, K. Merphy, and R. Claus, "White-light scanning fiber Michelson interferometer for absolute position-distance measurement," *Opt. Lett.*, Vol. 20, No. 7, pp. 785-787, 1995.
4. H. Kikuta, K. Iwata, and R. Nagata, "Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light," *Appl. Opt.*, Vol. 25, No. 17, pp. 2976-2980, 1986.
5. O. Nakamura, M. Goto, K. Toyoda, Y. Tanimura, and T. Kurosawa, "Development of a coordinate measuring system with tracking laser interferometer," *Annals of CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 523-526, 1991.
6. S. W. Kim, "New Design of Precision CMM based upon Volumetric Phase-Measuring Interferometry," *Annals of CIRP*, Vol. 51, No. 1, pp. 357-360, 2001.
7. H.G. Rhee, and S.W. Kim, "Absolute distance measurement by two-point diffraction interferometry," *Appl. Opt.*, accepted (Issue date : Oct. 1. 2002).
8. J. Ye, M. Takac, C. N. Berglund, G. Owen, and R. F. Pease, "An exact algorithm for self-calibration of two-dimensional precision metrology stages," *Prec. Eng.*, Vol. 20, No. 1, pp. 16-32, 1997.
9. ISO, "Guide to the expression of uncertainty in measurement," *International vocabulary of basic and general terms in metrology*, 2nd edition, 1993.
10. [www.nanotechnik.com/homepage](http://www.nanotechnik.com/homepage)