

간섭무늬 최대점 이동량의 감지를 이용한 초정밀 변위 측정 시스템

이종훈*, 김수현**, 곽윤근**

Ultra Precision Displacement Measuring System Using the Detection of Fringe Peak Movement

Jong Hoon Yi*, Soo Hyun Kim**, and Yoon Keun Kwak**

ABSTRACT

This paper proposes a precision displacement measuring method of detecting fringe movement of interferograms with a nanometric resolution. It is well known that the laser interferometer plays a useful and essential role in scientific and industrial application, but they have such error sources as an unequal gain of detectors, imbalanced beams, and lack of quadrature. These error sources degrade the accuracy of the interferometer. However, the fringe movement of interferograms has little relation with these error sources. In order to investigate performance of the proposed method, analysis and simulation were executed over random noise and wavefront distortion. Results of the simulation show that the proposed method is robust against these errors. Experiment was implemented to verify this method.

Key Words : Displacement Measurement (변위 측정), Fringe Peak (간섭무늬 최대점), Laser Interferometer (레이저 간섭계), Least-Square Algorithm(최소자승법)

1. 서 론

반도체 제조공정과 같은 첨단 사업 분야에서는 정밀한 위치결정 기술이 요구되고 있다. 이를 위해서는 나노미터 수준의 위치 정밀도와 안정적이고 높은 신뢰도를 갖는 측정방법 및 측정기기가 필수적인 요건이다. 이러한 요건을 만족시키는 측정 방법으로는 레이저와 같은 단색광을 이용한 간섭계가 대표적이라고 할 수 있다.

레이저를 이용한 간섭계는 정밀한 변위 측정을 위해 호모다인(homodyne) 간섭계⁽¹⁾, 다중파장(multiple-wavelength) 간섭계⁽²⁾, 헤테로다인(heterodyne) 간섭계⁽³⁾ 등이 연구되고 있다. 이러한 간섭

계는 변위 측정에 있어서 레이저 광강도의 변화, 광경로에 따른 광강도의 변화, 광검출기의 특성변화 등의 오차요인을 내포하고 있으며 신호 처리 과정에서 비선형성에 의해 측정 성능이 영향을 받는다⁽⁴⁻⁶⁾. 이러한 오차요인을 평가하고 보정하기 위하여 간섭 신호를 타원 방정식에 피팅(fitting)하는 방법에 대한 연구도 활발히 수행되고 있다⁽⁷⁻⁹⁾.

본 연구에서는 이러한 오차요인의 영향을 최소화할 수 있는 측정 방법과 신호 처리 방법에 대한 연구를 수행하였다. Fig. 1 에서와 같이 기준거울을 임의의 각도로 기울여 영상면에 등간격의 간섭무늬를 형성시키고 간섭무늬의 이동량을 감지함으로써 변위를 측정한다. 간섭무늬의 이동량을 구

2000년 12월 26일 접수

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

할 수 있는 일반적인 방법은 두 신호의 상호상관(cross-correlation) 함수를 이용하는 방법이다. 그러나, 이 방법은 많은 계산량으로 인하여 실시간 구현이 불가능하며 측정 정밀도가 픽셀단위로 제한되는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 간섭무늬 최대점(fringe peak)의 이동량으로부터 간섭무늬의 이동량을 구하는 방법을 제안한다. 간섭무늬의 최대점은 최소자승법을 이용하여 측정하였다. 그리고, 광학계에서 발생하는 파두면의 왜곡이 측정 성능에 미치는 영향을 분석하고 실험을 통해 측정 시스템의 타당성을 평가하였다.

2. 측정 원리

공간상의 두 빛은 파동적 특성에 의해 간섭 현상을 일으킨다. 이 때, 생성되는 간섭 무늬의 위상은 두 빛의 광로차에 의해 결정되므로 간섭무늬의 위상을 측정함으로써 변위를 구할 수 있다.

2.1 간섭무늬 최대점 감지에 의한 변위 측정

두 빛에 의한 간섭은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$I(x, y) = I_0(x, y) + V(x, y) \cos(k \Delta W) \quad (1)$$

식(1)에서 $I_0(x, y)$ 은 간섭무늬의 평균 광강도, $V(x, y)$ 은 간섭무늬의 선명도(Visibility)를 표시하며 k 는 파수(Wave number : $2\pi/\lambda$), ΔW 는 두 빛의 광로차를 나타낸다. Fig. 1 에서와 같이 간섭계에 입사되는 빛이 평면파이고 기준거울이 y 축과 임의의 각 θ 를 이루도록 기울이면 간섭광의 광로차는

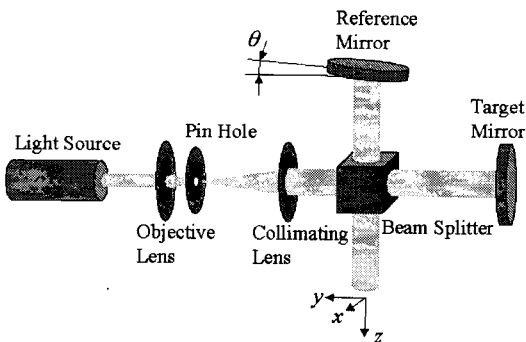


Fig. 1 Configuration of the proposed interferometer system

아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta W = \sin(2\theta) \cdot y - 2d \quad (2)$$

여기서, d 는 측정거울의 변위를 나타낸다. Fig. 1 의 간섭계에서 영상면에 생성되는 간섭무늬는 y 축에 수직한 등간격의 직선무늬가 된다. 이 때, 생성되는 간섭무늬는 측정거울의 변위에 따라 y 축 방향으로 이동한다. 따라서, 간섭무늬의 이동량을 측정함으로써 측정거울의 변위를 구할 수 있다.

두 신호사이의 지연량을 구하는 일반적인 방법은 두 신호의 상호 상관 함수(cross-correlation function)로부터 최대값을 갖는 위치를 찾는 방법이다⁹⁾. 그러나, 이 방법은 많은 계산량으로 인해 실시간 구현은 힘든 실정이다. 이를 극복하기 위해 많은 알고리즘이 연구되고 있으나 아직 실시간 구현은 불가능한 상태이다. 본 연구에서는 두 신호사이의 지연량을 얻기 위해 각 간섭무늬의 최대점 사이의 이동량을 측정한다.

간섭무늬의 최대점은 식(3)과 같이 광로차가 측정에 사용된 파장의 정수배일 때 발생한다.

$$\sin(2\theta) \cdot y_n - 2d = n\lambda \quad (3)$$

여기서, n 은 간섭무늬의 차수를 표시하며 y_n 은 간섭무늬의 n 차 최대점을 나타낸다. 측정거울의 변위가 d_k 일 때 간섭무늬의 최대점은 아래와 같다.

$$y_{nk} = \frac{n\lambda + 2d_k}{\sin(2\theta)} \quad (4)$$

따라서, 식(5)과 같이 측정거울의 변위 d_1 과 d_2 에 따른 간섭무늬의 최대점의 이동량으로부터 측정거울의 변위를 측정할 수 있다.

$$y_{n2} - y_{n1} = \frac{2(d_2 - d_1)}{\sin(2\theta)} \quad (5)$$

그러나, 실제 측정 시에 파두면의 왜곡이나 측정 잡음에 의해 간섭무늬의 변형이 발생된다. 이러한 간섭무늬의 변형은 측정 정밀도를 감소시키므로 이러한 영향을 줄이기 위하여 다수의 최대점을 평균하여 변위를 계산한다. 영상면에 생성되는 간섭무늬의 최대점이 $M+1$ 개일 때, 식(5)을 이용하

여 간섭무늬의 차수가 $N+1$ 부터 $N+M$ 까지 M 점에 대해 평균을 취한다.

$$\sum_{n=N+1}^{N+M} y_{n2} - \sum_{n=N+1}^{N+M} y_{n1} = 2M \left(\frac{d_2 - d_1}{\sin(2\theta)} \right) \quad (6)$$

식(6)의 좌변에서 $\sin(2\theta)$ 는 간섭무늬의 공간주파수와 선형적인 관계를 갖으므로 최대점 사이의 간격(간섭무늬의 주기)으로부터 쉽게 계산되어진다. 계산의 편의를 위해 간섭무늬의 차수 N 과 $N+M$ 사이의 간격으로부터 이 값을 계산하면 다음과 같다.

$$\sin(2\theta) = M\lambda / (y_{(N+M)2} - y_{N2}) \quad (7)$$

식(6)와 (7)을 이용하면 측정거울의 변위와 간섭무늬의 최대점 사이의 관계를 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2} \left\{ \left(\sum_{n=N+1}^{N+M} y_{n2} - \sum_{n=N+1}^{N+M} y_{n1} \right) / (y_{(N+M)2} - y_{N2}) \right\} \quad (8)$$

여기서, $\Delta d = d_2 - d_1$. 식(8)로부터 간섭무늬의 최대점을 구함으로써 측정거울의 변위를 측정할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 간섭 무늬 최대점 감지 방법

식(8)을 이용하여 측정거울의 변위를 측정하기 위해서는 간섭무늬의 최대점을 정밀하게 측정할 수 있어야 한다. Fig. 2 에서 간섭무늬의 최대점을 정밀하게 측정하기 위한 방법을 보여주고 있다. 간섭계에서 얻어진 간섭무늬 신호는 식 (9)와 같

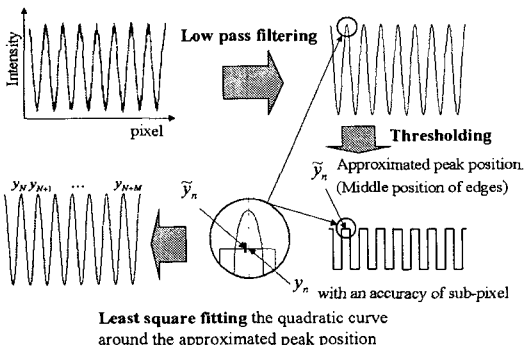


Fig. 2 Procedure for detecting the fringe peak positions

Table 1 Coefficients for equation (14)

m	1	2	3	4	5	6	7
b_1	4	20	8	200	100	28	560
b_2	1	7	3	77	39	11	221
b_3	-6	-10	-2	-30	-10	-2	-30

이 코사인 함수의 형태로 표현할 수 있다.

$$I_i = A \cos \beta(y_i - y_{peak}) + B \quad (9)$$

식(9)에서 I_i , y_i , y_{peak} 는 각각 i 번째 픽셀에서의 광강도, i 번째 픽셀의 위치, 최대점의 위치를 나타내며 A , B , β 는 곡선의 형태를 결정하는 상수값이다. 이 식을 최대점을 중심으로 테일러 전개(Taylor's expansion)하고 고차항을 무시할 때 아래와 같은 2차 다항식으로 근사할 수 있다.

$$I_i \approx A + B - \frac{A\beta^2}{2} (y_i - y_{peak})^2 = a_0 + a_1 y_i + a_2 y_i^2 \quad (10)$$

이 때, 최대점의 위치는 $y_{peak} = -a_1/2a_2$ 와 같이 다항식의 계수로부터 구할 수 있다. 이와 같이 간섭무늬의 강도를 2 차 다항식으로 근사할 수 있는 것은 간섭 무늬의 최대점 부근에서만 가능하다. 따라서, 간섭신호를 2 차 다항식으로 근사하기 위해서는 대략적인 최대점의 위치를 알아야 한다. 본 연구에서는 대략적인 최대점의 위치를 얻기 위해 Fig. 2 에서와 같이 임계값(Threshold)을 적용하는 기법을 이용하였다. 간섭 신호의 평균값을 임계값으로 취하여 각 모서리 위치의 중간값을 간섭

Table 2 The error for fringe peak detection with random noise ($I_i = \text{round} [100 + 100 \cos(2\pi/\text{Period})(y_i - y_{peak}) + \text{noise}]$, $-0.5 < y_{peak} < 0.5$), noise : random noise (0-5 gray values)

Period	Number of pixels (2m+1)						
	3	5	7	9	11	13	15
9	0.020	0.023	0.051	0.101	0.164	0.297	0.688
15	0.057	0.020	0.021	0.031	0.047	0.069	0.105
21	0.126	0.038	0.024	0.022	0.025	0.034	0.045
27	—	0.062	0.035	0.026	0.022	0.024	0.028
33	—	0.095	0.051	0.035	0.028	0.024	0.025
39	—	0.142	0.071	0.048	0.037	0.029	0.027
45	—	0.183	0.094	0.066	0.047	0.037	0.031

무늬의 대략적인 최대점(\bullet_{peak})으로 선택하였다. 이와 같이 구한 최대점 부근에서 최소자승법(Least-Square Algorithm)을 적용하여 식(13)의 계수를 구하면 다음과 같이 간섭무늬의 최대점을 구할 수 있다.

$$y_{peak} = \frac{b_2 \sum_{i=-m}^m i I_{i+i_{peak}}}{b_1 \sum_{i=-m}^m I_{i+i_{peak}} + b_3 \sum_{i=-m}^m i^2 I_{i+i_{peak}}} + \tilde{y}_{peak} \quad (11)$$

여기서, i_{peak} 는 \bullet_{peak} 에 해당하는 픽셀을 나타내며 계수 b_1, b_2, b_3 는 최소자승법에 사용되는 픽셀 수 $(2m+1)$ 에 의해 결정되는 상수이다. Table 1 에 각 픽셀 수에 따른 계수를 표시하였다.

식(14)에서 간섭무늬의 최대점은 최소자승법에 의해 근사된 값이므로 오차를 내포하고 있다. 최소자승법에 의해 구한 간섭무늬 최대점의 추정오차는 간섭무늬의 공간주기와 계산에 사용된 픽셀 수 $(2m+1)$ 의 관계에 의해 결정되어진다. Table 2 에는 측정 잡음이 존재할 때 간섭무늬의 주기와 픽셀 수에 따른 간섭무늬 최대점의 추정 오차를 표시하고 있다. Table 2 에서 굵은 숫자는 각각의 간섭무늬의 주기에서 오차가 최소인 부분을 나타낸다. 간섭무늬의 주기가 증가함에 따라 추정오차가 최소가 되는 픽셀 수도 함께 증가한다. 즉, 간섭무늬의 주기에 따라 추정오차가 최소가 되는 최적의 픽셀수가 존재하는 것을 알 수 있다. Table 2 에서는 최적의 픽셀수가 대략적으로 간섭무늬 주기의 1/3 수준에서 결정되어지는 것을 볼 수 있다.

3. 오차 해석

레이저 간섭계를 이용한 변위 측정에는 편광의 비직교성, 불완전한 편광 분리기, 측정기 이득의 불일치, 광원의 불안정 등 여러 가지 오차 요인이 존재한다. 그러나, 이러한 오차 요인은 간섭무늬의 이동에 거의 영향을 주지 않으므로 본 연구에서 제안된 측정 시스템에서는 중요한 요인으로 작용하지 않으나 파두면의 왜곡은 간섭무늬의 생성에 직접적인 영향을 끼치므로 가장 중요한 오차 요인으로 작용한다. 따라서, 본 시스템에서 파두면의 왜곡이 변위 측정 성능에 끼치는 영향에 대한 분석을 수행하고 이러한 오차 요인과 측정

시 시스템에 포함되는 불규칙한 소음에 대한 모의 실험을 수행한다.

3.1 오차 요인

Fig. 1 에서와 같이 시준 렌즈(Collimating Lens)에 의해 시준되는 빛은 광학 평면의 불균일성과 광학 요소들의 부정확한 정렬 등에 의해 완전한 평면파로 구현하기 어렵다. 특히, 시준 렌즈와 대물 렌즈의 초점이 정확히 일치하지 않을 때에는 평면파가 아닌 구면파가 생성된다. 일반적으로 빛이 광학 요소를 통과하게 되면 여러 가지 원인에 의해 파두면의 왜곡이 발생한다. 이 때, 발생하는 파두면의 왜곡을 $W_d(x,y)$ 로 정의하면 실제 광로차는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta W = \sin(2\theta) \cdot y - 2d + W_d(x, y) \quad (12)$$

이 때, 간섭무늬의 최대점의 위치는 아래와 같이 구해진다.

$$y_{nk} = \frac{n\lambda + 2d_k - W_d(x, y)}{\sin(2\theta)} \quad (13)$$

이 식을 앞에서 구한 변위 측정을 위한 식(14)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta \tilde{d} = \frac{\Delta d - \sum_{n=N+1}^{N+M} (W_d(x, y_{n2}) - W_d(x, y_{n1})) / 2M}{1 - (W_d(x, y_{(N+M)2}) - W_d(x, y_{N1})) / M\lambda} \quad (14)$$

$$= \frac{\Delta d - \sum_{n=N+1}^{N+M} \Delta W_{dn} / 2M}{1 - (W_d(x, y_{(N+M)2}) - W_d(x, y_{N1})) / M\lambda}$$

여기서, $\Delta \tilde{d}$ 는 제안된 알고리즘에 의해 계산되어진 측정거울의 변위이고, Δd 는 실제 측정거울의 변위를 나타내며, $\Delta W_{dn} = W_d(x, y_{n2}) - W_d(x, y_{n1})$ 으로 정의한다. 이 식에서 파두면의 왜곡은 변위 측정에 있어서 오차 요인으로 작용함을 알 수 있다. 파두

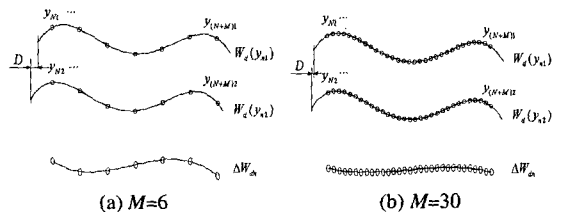


Fig. 3 Wavefront distortion

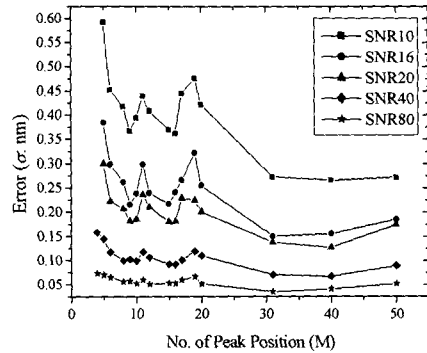
면의 왜곡량이 많으면 심각한 측정 오차를 유발하지만 일반적으로 적절히 설계된 광학 시스템에서의 파두면의 왜곡은 파장 이하의 수준으로 매우 작은 값이다. 그러나, 정밀한 측정을 위해서는 파두면의 왜곡에 의한 영향을 필히 고려하여야 한다. 식(17)에서 측정 오차로 작용하는 부분은 크게 분자항과 분모항으로 구분할 수 있다. 분모항은 동일한 간섭무늬의 양 끝단에서 발생하는 파두면 왜곡의 차이에 의한 부분이며 간섭무늬 최대점의 개수(M)에 반비례한다. Fig. 3 에서 간섭무늬 최대점의 개수에 따른 파두면의 왜곡항 ΔW_{dm} 의 변화를 보여주고 있다. 일정한 구간에서 간섭무늬 최대점의 개수를 증가시키기 위해서는 Fig. 3 에서와 같이 간섭무늬의 공간 주기가 감소하여야 한다. 따라서, M 의 증가에 따라 간섭무늬의 이동량 D 가 감소하게 되므로 ΔW_{dm} 는 0으로 수렴하게 된다. 그러므로, 측정시 파두면의 왜곡에 의한 영향은 M 을 증가시킴으로써 줄일 수 있다. 그러나, 간섭무늬를 측정하기 위해 CCD와 같은 일정한 픽셀수를 갖는 측정기를 사용하여야 하므로 최대점의 개수를 무한히 증가시킬 수 없으며, 최대점의 개수가 증가할수록 간섭무늬의 공간 주기가 감소하므로 최대점 위치 측정 분해능이 감소하게 된다. 따라서, 이와 같은 여러 가지 요인을 고려하여 적절한 최대점의 개수를 선택하여야 최적의 성능을 얻을 수 있다.

3.2 모의 실험

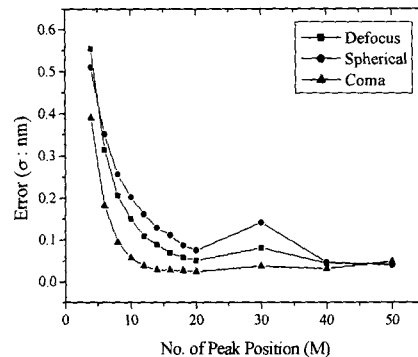
2장에서 제안된 변위 측정 방법에 대한 타당성 평가를 위해 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험에서는 불규칙한 측정 잡음과 파두면의 왜곡에 의해 야기되는 측정 오차를 평가하였다. 파두면의 왜곡은 일반적으로 다항식의 형태로 표현이 가능하다⁽¹¹⁾. 특히, 일반적인 광학계에서 많이 발생하는 초점의 종이동오차(defocus), 구면수차(spherical aberration), 그리고 코마(coma)에 대하여 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험에 사용된 간섭무늬는 아래 식을 이용하여 생성하였다.

$$I_i = 100 + 100 \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} (y_i \sin 2\theta - 2d) + W_d(y_i) \right\} + \text{noise} \quad (15)$$

Fig. 4 (a)는 간섭무늬에 측정 잡음이 존재할 때 최대점의 개수에 대한 측정 오차를 보여주고 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Simulation results : (a) with random noise, (b) with wavefront distortion

측정 잡음이 클수록 측정 오차는 커지며 최대점의 개수가 많을수록 측정오차는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 최대점의 개수가 30 이상에서는 거의 일정한 오차를 보임을 알 수 있다. 비교적 낮은 SNR에서도 측정 오차는 0.3 nm 이하로 나타난다.

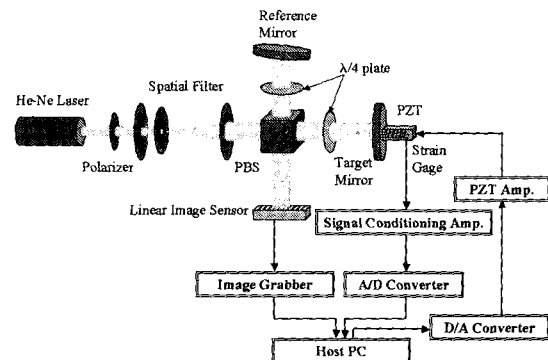


Fig. 5 Experimental setup for the laser interferometer

Fig. 4 (b)는 파두면의 왜곡에 의한 측정 오차를 표시하고 있다. 이 때, 파두면 왜곡의 최대량은 $\lambda/5$ 로 설정하였다. 각각의 파두면의 왜곡에 대하여 비슷한 경향을 보이며 최대점의 개수가 작을 때에는 오차가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 최대점의 개수가 20 이상에서는 거의 비슷한 수준의 오차를 보여준다. 따라서, 측정 잡음과 파두면의 왜곡에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 최대점의 개수를 30~40 정도에서 설정하는 것이 최적임을 알 수 있다.

4. 실험 결과

제안된 간섭무늬 최대점의 감지를 이용한 변위 측정 방법의 타당성을 검증하기 위한 기초실험을 수행하였다. Fig. 5은 실험 장치의 구성을 보여주고 있다. 결상 렌즈에 의해 형성된 간섭 무늬는 선형 CCD를 이용하여 얻어지며 측정거울의 변위 생성을 위해 PZT를 사용하였다. 또한, 비교 실험을 위해 PZT에 스트레인 게이지를 부착하여 PZT의 변위를 직접 측정하였다.

Fig. 6은 제안된 측정방법을 이용하여 변위를 측정한 결과를 보여주고 있다. 측정 시스템의 안정성을 검증하기 위해 측정거울이 정지해 있을 때의 변위를 측정해 본 결과가 Fig. 6(a)이다. 측정은 1초마다 한번씩 수행하였으며 20분 동안의 측정 결과를 표시하였다. 이 때, 측정 오차의 표준 편차는 0.897 nm 이며 평균값은 0.197 nm 로 측정되었으며 약간의 드리프트(drift)가 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 측정 시스템의 전기적인 잡음에 의한 것을 보여진다.

Fig. 6(b)는 측정 거울에 선형적인 변위를 인가하여 변위를 측정해 본 결과이다. 약 $1.3\ \mu\text{m}$ 의 변위를 10회 반복하여 측정하였다. 이 때, PZT의 변위를 스트레인 게이지를 통해 동시에 측정하였으며 Fig. 6(b)의 x축은 스트레인 게이지의 출력을 표시하였고, y축은 측정 시스템의 출력을 표시하였다. 실험결과를 선형 피팅한 결과에 대한 오차의 표준 편차는 2.7 nm 이다. 실험 결과로부터 제안된 측정 시스템의 타당성을 검증할 수 있으며 측정 성능을 향상시키기 위해서는 측정시 전기적 측정 잡음에 대한 고려가 필수적임을 알 수 있었다.

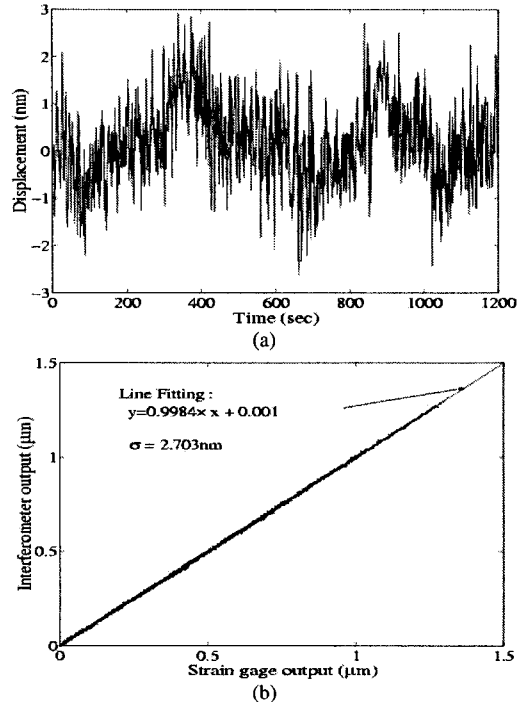


Fig. 6 Experimental results : (a) Free condition, (b) Linear displacement

5. 결론

본 연구에서는 나노미터(nm) 수준의 초정밀 변위 측정을 위해 간섭 무늬 최대점의 이동량을 감지하는 방법을 제시하였다. 간섭 무늬의 최대점을 감지하기 위하여 간섭 신호를 2차 다항식으로 근사하고 최소 자승법을 적용하였다. 이 때, 추정 오차는 간섭 무늬의 주기와 추정에 사용된 CCD의 픽셀수에 밀접한 관계를 갖음을 알 수 있었다. 제안된 측정 시스템에서 발생하는 오차 요인 중 파두면의 왜곡과 측정 잡음에 의한 영향을 오차해석과 모의 실험을 통해 분석하였으며 이러한 영향은 간섭무늬 최대점의 개수를 증가시킴으로써 줄일 수 있음을 보였다. 또한, 측정 시스템의 성능을 기본적인 실험을 통해 검증하였으며 기존의 측정 방법에 비하여 보다 안정적인 측정이 가능하다.

후 기

본 연구는 BK21 사업에서 일부 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. Rugar, D., Mamin, H. J., Erlandsson J. E. R., and Terris, B. D., "Force microscope using a fiber optic displacement sensor," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 59, pp. 2337-2340, 1988.
2. Dandliker, R., Hug, K., Politch, J., and Zimmermann, E., "High-accuracy distance measurements with multiple-wavelength interferometry," *Optical Engineering*, Vol. 34, pp. 2407-2412, 1995.
3. Zhao, Y., Zhou, T., and Li, D., "Heterodyne absolute distance interferometer with a dual-mode HeNe laser," *Optical Engineering*, Vol. 38, pp. 246-249, 1999.
4. Huo, W. and Wilkening G., "Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometer," *Precision Engineering*, Vol. 14, pp. 91-98.
5. Wu, C-M and Su C-S, "Nonlinearity in measurement of length by optical interferometry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7, pp. 62-68, 1996.
6. Bobroff, N., "Recent advances in displacement measuring interferometry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 4, pp. 907-926, 1993.
7. Heydemann, P. L. M., "Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers," *Applied Optics*, Vol. 22, pp. 3382-3384, 1981.
8. Wu, C.-M., Su, C.-S., and Peng G.-S., "Correction of nonlinearity in one-frequency optical interferometry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7, pp. 520-524, 1996.
9. Jacovitti, G. and Scarano, G., "Discrete time techniques for time delay estimation," *IEEE Trans. On Signal Processing*, Vol. 41, No. 2, pp. 525-533, 1993.
10. Malacara, D., *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, pp. 456-472, 1992.