

4점법을 이용한 모아레식 레이저 엔코우더의 정밀 정확도 향상

전 병 욱,* 박 두 원,** 이 명 호***

Improvement of Accuracy in Moire-type Laser Encoder Using Four Point Method

Byeong Wook Jeon,* Too Won Park,** Myung Ho Lee***

ABSTRACT

Presently, along with the advance of high-technology, the precise measurement of linear displacement has become a staple requirement, and consequently the high resolution with sub-micron order has also been required in precise positioning and carrying.

In this paper, we advance a propose on a new type of laser encoder based on the principle of phase analysis of the moire fringes from superimposed two gratings. The phase angle as an information of displacement can be accurately calculated by detecting the change in brightness at four points of the fringes. The actual application of four point method to the moire fringes is performed thru microcomputer for general purpose, and the measuring procedure is also studied in this research.

As an experimental result, in the case of using 20 μ m-pitch gratings, it is validated that this method has the resolution of 0.01 μ m and the accuracy of $\pm 0.15\mu$ m over the setting range of 100mm.

LIST OF SYMBOL

I_i	: Intensity of Light at Four Slits ($i=1, 2, 3, 4$)	λ	: Wave Length of Light
φ	: Phase Angle of Moire Fringe	t	: Distance between Two Gratings
a	: Slit Distance	$f_{tr}(\varphi)$: Fourier Series of Triangular Wave
p	: Coefficient of Grating	$f_{re}(\varphi)$: Fourier Series of Rectangular Wave
n, m	: Integer	I_{tri}	: Intensity of Light at Four Slits (Triangular Wave) ($i=1, 2, 3, 4$)
		I_{rei}	: Intensity of Light at Four Slits (Rectangular Wave) ($i=1, 2, 3, 4$)

* 현대자동차(주) 중앙연구소 연구3팀

** 명지전문대학 기계설계과

*** 서울산업대학교 기계설계과

1. 서론

현재, 생산 가공 분야에 있어서 직선 변위 또는 위치의 검출은 첨단 기술의 발달과 더불어 하나의 중요한 기술적 요건이 되었고, 위치 결정이나 이송의 단위에도 서브마이크론 오더(submicron order)의 고분해능이 요구되어 왔다.

생산 가공 시스템을 구성하는 CNC 공작기계 및 산업용 로봇, 또는 리소그래피(lithography)와 관련된 반도체 제조장치 및 3차원 측정기등 각종 초정밀 이송 제어 기계류의 고성능화는 정밀한 기계 가공과 제어 시스템의 최적 구성에 의해 실현되지만, 결국 이러한 장치의 제어 정밀 정확도는 그 장치의 위치 결정 능력, 즉 정확한 변위 계측 능력에 의해 크게 제한 받게 된다.

본 논문에서는 각종 위치 제어 기계류의 정밀도에 가장 영향력 있는 센서인 위치 검출기, 그 중에서도 레이저를 광원으로 하는 레이저 엔코우더(laser encoder)의 정밀 정확도 향상을 연구한다.

리니어 스케일의 눈금 간격을 측정의 기준으로 하여 기계적 변위량을 검출하고 이것을 디지털 신호로 변환하는 변위 센서를 엔코우더라고 한다.

지금까지 일반화 되어 있는 엔코우더는 리니어 스케일의 눈금 펄스수를 계수하여 이를 길이량으로 변환하는 방식이 대부분이기 때문에 비교적 측정 오차가 크고, 분해능을 높이기 위해서는 기준 스케일의 눈금을 더욱 좁혀야 하는등 기술적으로 많은 한계가 있고,⁽¹⁾ 따라서 고정밀 정확도가 요구되는 측정에 리니어 엔코우더를 사용하는 데에는 다소 무리가 있다.

본 연구에서는 스케일 신호를 광학적으로 확대하고, 그 간격오차를 평균화하여 측정의 신뢰성을 높일 수 있는 모아레 법(Moire method)⁽²⁾을 이용한다. 특히 모아레 신호의 검출에 4점법(four point method)⁽³⁾을 적용하여 간섭 무늬의 위상 변화량을 길이량으로 직접 변환함으로써 실제 스케일 간격보다 훨씬 작은 서브마이크론 단위의 고분해능을 효율적으로 얻을 수 있는 매우 정확한 변위 계측 기법을 제안한다.

2. 변위 측정의 원리 및 적용 기법

2-1 모아레 무늬의 발생 원리 및 성질

투명 유리판 위에 수 십 μm 간격의 눈금을 규칙적으로 새겨 넣은 광학 격자(회절 격자) 2개를 서로 약간의

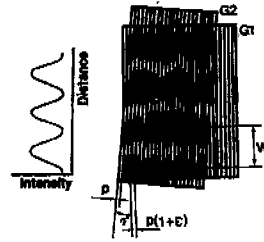


Fig. 1 Geometrical analysis of Moire fringe

각도를 두고 중첩시킨 후, 그 2개의 격자에 빛을 투과시키면 Fig. 1과 같이 등간격의 명암선을 지닌 간섭 무늬가 발생된다. 이것을 모아레 무늬(moire fringe)라고 한다. 모아레 무늬는 미소한 격자 간격을 확대하는 성질 이외에도 격자간의 눈금 오차를 평균화 하여 고정밀 정확도의 위치 검출을 가능케 하는 성질을 지니고 있다. 모아레법은 길이 측정 이외에도 형상 측정을 통한 2차원적 스트레인 해석에도 사용되고 있는 광학적 변위 측정법⁽⁴⁾이다.

2-2 4점법의 원리 및 모아레법에 대한 적용

4점법(four point method)은 간섭 무늬의 위상을 계산하는 위상 해석법으로서 블록 게이지의 편평도 자동 측정을 위한 레이저 간섭계에 일부 적용되고 있는 방법이다. 이 원리는 격자 1주기에 해당하는 등간격 간섭 무늬상에 4개의 광전 소자를 특정 간격으로 배열하여 각 위치에서의 신호를 동시에 검출하고, 그 신호의 강도를 비교·연산하여 변위에 따른 위상 변화량을 얻는 것으로서, 본 연구에서는 모아레 신호의 검출 및 이송 변위량 계산에 이 4점법을 도입하여 그 적용성을 검토하였다.

Fig. 2에 있어서 세로축을 간섭 무늬의 강도, 가로축을 위상각으로 하고 S_1, S_2, S_3, S_4 의 위치에 각각 슬릿이 있다고 가정한다. 또한 각각의 슬릿에는 광전 검출 소자가 부착되어 슬릿을 통과한 모아레 무늬의 정현적인 명암 강도가 각각의 소자로 부터 검출될 수 있도록 되어 있다. 슬릿을 통과한 광강도를 각각 I_1, I_2, I_3, I_4 , 간섭 무늬의 위상각으로 나타낸 슬릿 간격을 2α 라 하고, 측정점 M의 위치에서의 위상각을 ϕ 라고 하면 각각의 위치에 대한 광강도는 다음과 같이 표시될 수 있다.

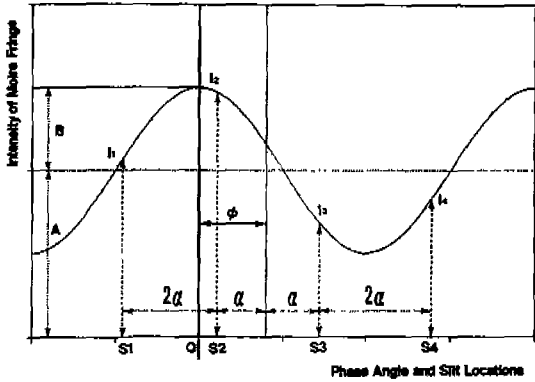


Fig. 2 Four point method for detection of Moire fringe

$$\begin{aligned} I_1 &= A + B \cos(\varphi - 3\alpha), & I_2 &= A + B \cos(\varphi - \alpha) \\ I_3 &= A + B \cos(\varphi + \alpha), & I_4 &= A + B \cos(\varphi + 3\alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)로부터

$$\begin{aligned} a_1 &= I_2 - I_3, & a_2 &= I_1 - I_4, & a_3 &= I_1 + I_4, \\ a_4 &= I_2 + I_3 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} b_1 &= a_4 - a_3 = 8B \cos \varphi \sin^2 \alpha \cos \alpha \\ b_2 &= 3a_1 - a_2 = 8B \sin \varphi \sin^3 \alpha \\ b_3 &= a_1 + a_2 = 8B \sin \varphi \sin \alpha \cos^2 \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

윗 식을 조합하면 다음의 관계식을 얻는다.

$$\begin{aligned} b_2 b_3 &= 64 B^2 \sin^2 \varphi (\sin^2 \alpha \cos \alpha)^2 \\ b_1^2 &= 63 B^2 \cos^2 \varphi (\sin^2 \alpha \cos \alpha)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

이와 같은 관계로부터

$$\begin{aligned} \tan^2 \varphi &= b_2 b_3 / b_1^2 \\ &= \frac{(-I_1 + 3I_2 - 3I_3 + I_4)(I_1 + I_2 - I_3 - I_4)}{(-I_1 + I_2 + I_3 - I_4)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

의 식이 성립되고, 따라서 네 점에서 측정된 광강도 I_1, I_2, I_3, I_4 만으로 측정점의 위상각을 구할 수 있게 된다. 식(5)를 sin항과 cos항으로 구분하면 다음과 같이 변

형된다.

$$\begin{aligned} \sin^2 \varphi &= b_2 b_3 / (b_1^2 + b_2 b_3) \\ \cos^2 \varphi &= b_1^2 / (b_1^2 + b_2 b_3) \end{aligned} \quad (6)$$

식(5)의 계산 정밀 정확도를 고려하면, 그 값은 $b_2 b_3, b_1^2, b_1^2 + b_2 b_3$ 의 값이 최대로 될 때 가장 양호해 지므로 식(4)가 최대값을 갖도록 α 를 결정하여야 한다.

즉, $\sin^2 \alpha \cos \alpha$ 의 값이 최대치가 되도록 α 를 결정하기 위해서 $g(\alpha) = \sin^2 \alpha \cos \alpha$ 로 하여 $dg(\alpha)/d\alpha = 0$ 을 만족하는 α 를 구하면, $\alpha = \sin^{-1} \sqrt{2/3}$, 즉 $0.9553166 \text{ rad} (=54.73516^\circ)$ 이 얻어지며, 이 α 값을 기준으로 하여 광전 소자의 배열 위치를 결정할 때 가장 높은 계산 정밀 정확도를 얻을 수 있다.

결국, 신호의 주기가 2π 로 되는 위치가 격자의 한 눈금에 해당된다는 점을 고려하면, 모아레 신호의 위상 변화에 따른 이동 격자의 변위량은 다음의 비례식으로 부터 구해진다.

$$\text{Displacement} = \frac{p}{2\pi} \varphi \quad (7)$$

식(7)에 있어서 격자 정수 p 는 리니어 스케일의 선정에 따라 결정되는 값이고 위상 변화량 φ 는 식(5)에 의해 얻어지므로, 결국 구하고자 하는 변위량은 네 점에서 측정된 광강도만으로 산출될 수 있음을 알 수 있다.

물론 위의 식(7)은 스케일 1눈금의 위상이므로 실제의 적용을 위해서는 1눈금마다 스케일 카운트를 증가시키고 값을 갱신하여 항상 마지막 눈금의 위상이 취해지도록 하는 것이 누적 계산 오차를 최소화 하는 방법일 것이다.

2-3 스케일 간극의 변동에 따른 파형 오차의 해석

일반적으로 모아레 방식을 사용하는 대부분의 리니어 엔코우더에서는 간극의 변동과는 무관하게 안정된 파형을 얻는 수단으로서 회절 격자를 투과한 2차 회절광의 모아레 무늬를 검출하고 있지만, 본 측정 시스템에서는 광학계를 단순화시킬 수 있고 가장 휘도 높을 모아레 무늬를 얻을 수 있는 0차 회절광을 이용한다. 그러나 모아레 무늬의 0차 회절광을 얻어 위치를 검출하는 경우, 그 측정 오차는 스케일이 고유하게 지니고 있는 눈금 오차 이외에도, 측정에 사용된 두 스케일간의 간극(gap)변동으로 인한 파형 오차가 개입된다.⁽⁶⁾

본 측정 시스템의 경우, 모아레 무늬의 이론적인 강도 분포를 식(3)에 따라 여현 함수로 정의하여 그 위상을 계산하였지만, 실제의 모아레 무늬의 광강도 곡선은 이론과 같이 정확한 여현 또는 정현 함수가 되지 않기 때문에 파형을 식(3)과 같이 가정하는 경우, 파형의 변화에 따라 검출 오차가 발생하게 된다.

회절 이론에 따르면 0차 회절된 모아레 무늬의 출력 파형은 두 스케일간의 간극에 의해 결정되는데, 두 스케일이 가장 근접하였을때, 즉 두 스케일이 서로 접촉한 상태에서 마찰 없이 이동하는 경우 모아레 신호로서 삼각 파형이 얻어진다. 그리고 그 위치로 부터 격자 간극을 점차 크게 변화시키면서 파형을 관찰하면 처음에 얻어졌던 삼각 파형은 회절 현상에 의해 정현파에 가까워 지게 되며, 또한 그 위치로 부터 간극을 더욱 크게 해주면 모아레 신호의 파형은 거의 구형파로서 나타나게 된다.

따라서 측정 오차를 줄이기 위해서는 가장 이상적인 정현파가 얻어질 수 있도록 두 격자간의 최적 간극을 설정하고, 그 간극이 측정중에 변화하지 않도록 광학계를 얼라인먼트하는 것이 매우 중요하다고 하겠다.

이론적으로 격자의 간극은

$$t = \frac{np^2}{\lambda} \quad (8)$$

의 조건이 성립되는 위치에서 가장 휘도(brightness)높은 간섭 무늬 신호인 삼각 파형이 얻어지는데, 센서로부터 정현파 신호를 취해야 하는 본 측정 시스템의 경우, 두 격자의 간극을 $t = (0.2+n)p^2/\lambda$ 또는 $t = (0.8+n)p^2/\lambda$ 가 되도록 조정하여 광학계를 구성하였다.⁽⁶⁾

그러나 실제로 광학 부품상에 회절 격자를 고정시키고 격자 간극을 셋팅할 때 두 격자의 평행을 정확히 맞추는 것이 또는 격자 간극을 정밀하게 측정하여 고정시키는 과정에서 격자 간극이 미소하게 변형되고 결국 파형 오차는 필연적으로 발생될 수 밖에 없기 때문에,⁽⁷⁾ 어긋난 파형의 범위를 정현파로 부터 삼각파 또는 구형파의 범위로 나누어 각각의 파형을 푸리에 급수(Fourier series)의 형태로 표시하고, 이 푸리에 급수를 식(1)에 대입하여 계산한 위상과, 정현 신호로서 계산한 이상적인 위상을 서로 비교하여 격자 간극의 변동시에 야기되는 파형 오차의 가능 한계를 검토하였다.

지금 검출된 모아레 신호의 파형이 완전한 삼각 파형이라고 가정하면 신호 파형의 변화는 각각 다음과 같이

표현할 수 있다.

$$f_{tr}(\varphi) = A + \frac{8B}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin(m\pi/2)}{m^2} \sin m\varphi \quad (9)$$

한편 모아레 신호의 파형이 완전한 구형파가 될 때까지 두 격자의 간극 위치가 크게 변화하였다고 가정하면 신호 파형의 변화는

$$f_{re}(\varphi) = A + \frac{2B}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos m\pi)}{m} \sin m\varphi \quad (10)$$

으로 나타낼 수 있다.

즉, 식(9)와 식(10)을 식(3)에 대입하면 네 점에서의 광강도는 각각 다음과 같이 표현된다.

□ CASE 1 *Triangular Wave*:

$$\begin{aligned} I_{tr1} &= f_{tr}(\varphi - 3\alpha), & I_{tr2} &= f_{tr}(\varphi - \alpha) \\ I_{tr3} &= f_{tr}(\varphi + \alpha), & I_{tr4} &= f_{tr}(\varphi + 3\alpha) \end{aligned} \quad (11)$$

□ CASE 2 *Rectangular Wave*:

$$\begin{aligned} I_{re1} &= f_{re}(\varphi - 3\alpha), & I_{re2} &= f_{re}(\varphi - \alpha) \\ I_{re3} &= f_{re}(\varphi + \alpha), & I_{re4} &= f_{re}(\varphi + 3\alpha) \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 이 함수로 부터 위상을 계산하고, 여현 함수로 정의하였던 이상치와의 차이를 구하면 광신호로서 삼각파 및 구형파가 검출되는 경우에 유발되는 검출 오차의 최대값을 결정할 수 있다. Fig. 3에 파형 변동에 따른 위상과 이상적인 간극 위치에서 얻어지는 위상과의 차를 스케일 신호 1주기에 대하여 각각의 오차를 비교하였다.

Fig. 3의 결과로부터 삼각파의 경우가 구형파의 경우 보다 더 작은 오차를 갖고 있기 때문에, 스케일의 간극을 설정할 때 구형파가 되는 위치를 피하면 스케일 간극에 미소한 변동이 있어도 측정 오차를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다.

3. 레이저 엔코우더에 의한 변위 측정

3-1 광학계의 구성

본 연구의 변위 측정 시스템을 실제로 적용하기 위해

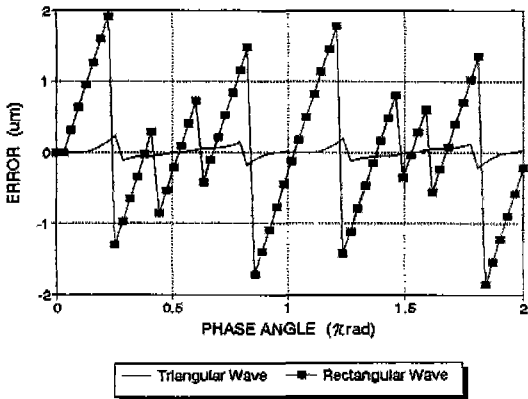


Fig. 3 Simulated error curves caused by the varied wave shape

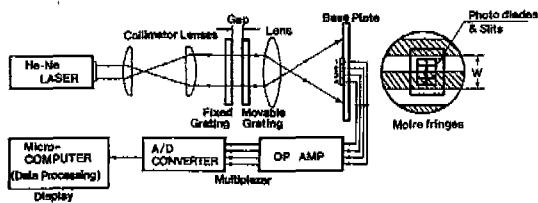


Fig. 4 Opto-electronic system for the measurement of displacement

시험적으로 제작한 광학계의 원리적 구성을 Fig. 4에 보였다.

모아레 무늬를 생성시키기 위한 광원으로는 단색광으로서 여러 종류의 프로젝터(projector)가 사용될 수 있지만, 본 실험에서는 파장의 안정성이나 간섭성 및 단색성이 우수한 He-Ne 레이저를 사용하였다.

광원으로 부터 출사된 파장 $0.6328\mu\text{m}$ 의 적색광 레이저 빔은 콜리메이터 렌즈(collimator lens)를 거쳐 평행 광속이 되고, 이 광선은 미소각 γ 만큼 경사지게 고정되어 있는 격자 간격 $20\mu\text{m}$ 의 인덱스 격자(index grating)에 입사된다.

인덱스 격자를 통과한 회절광은 동일 격자 간격의 메인 격자(main grating)를 투과한 후 렌즈로 확대되어 포토 다이오드열(photo diode array)로 구성된 광전 검출 소자의 기판상에 모아레 무늬를 만든다. 이 때 격자의 투과광에 의해 생성된 모아레 무늬는 격자 간격의 일정 배수를 갖는 수평의 연속 명암선으로 나타나며, 메인 격자가 이송 장치에 의해 일정 속도로 이송 될 때, 이 간섭 무늬에서 측정되는 빛의 강도는 격자 눈금

1개의 이동 간격을 1주기로 하는 정현적인 전기 신호로서 변환될 수 있다.

3-2 신호 처리 시스템의 구성

두 개의 회절 격자에 의해 생성된 모아레 무늬는 렌즈로 적당하게 확대된 후, 고정되어 있는 광전 검출 소자에 의해 전기 신호로 변환된다. 4점법의 적용을 위해 광전 검출부는 모두 4개의 슬릿과 4개의 포토 다이오드로 구성되고, 각 소자는 전술한 2α 만큼의 등간격을 이루도록 부착되어 있으며, 광전 소자에 의해 변환된 4개의 전기 신호는 가변 증폭률을 가진 증폭기(OP Amp)로 증폭된 후 A/D변환기를 거쳐 고속 처리가 가능한 마이크로 컴퓨터에 입력된다.

본 실험에서는 연산 루프를 통해 1초당 약 2000개의 변위 정보를 받아들일 수 있도록 설정하고 있는데, 실험에서 사용한 0.02mm/sec 의 이동대의 이송에 의한 간섭 무늬의 변화 주기가 약 1Hz라는 점을 감안하면 결국 격자의 한 눈금이 2000분할 되는 것이며, 따라서 사용한 격자의 눈금 간격이 $20\mu\text{m}$ 일 때, 약 $0.01\mu\text{m}$ 의 내삽 분해능으로 변위를 측정할 수 있다. 물론 부동소숫점(floating point)의 고속 연산이 가능한 컴퓨터 환경하에서는 훨씬 빠른 속도의 이송으로도 동일한 수준의 분할율을 쉽게 얻을 수 있다.

즉, 이와 같은 스케일 신호의 분할에 의해 실제 눈금 간격의 수 천분의 1에 해당되는 초미소 변위의 측정이 가능하게 된다.

4. 실험 결과 및 고찰

이송 변위에 따른 모아레 무늬를 얻기 위해서 메인 스케일을 고정 유닛상에 슬라이더 유닛의 이동 방향으로 부착시키고, 슬라이더 유닛상에는 인덱스 스케일을 메인 스케일과 평행이 되도록 고정시킨다. 그리고, 모아레 무늬가 형성되도록 인덱스 스케일을 약간의 각도로 기울이는데, 그 기울임 각도는 모아레 무늬의 명암 폭이 수광 소자 어레이의 폭보다 다소 크게 되도록 결정한다.

또한, 인덱스 스케일과 메인 스케일의 간극은 식(8)에 따라 이론적으로 가장 정현파에 가까운 광출력 신호가 얻어지는 $126\mu\text{m}$ 의 최적 간극으로 설정하고, 이를 4개의 수광 소자로 검출하면 Fig. 5와 같이 감도 높은 전기 신호가 얻어진다.

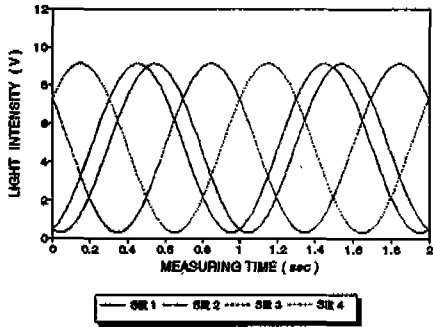


Fig. 5 Detected fringe intensity obtained from four sensors

사용된 슬릿은 약 $1\mu\text{m}$ 의 정밀 정확도로 가공되어 있으므로 모아레 무늬의 간격을 양쪽 끝단의 슬릿 중심 간격과 거의 동일하게 조정할 경우 슬릿 간격에 의한 모아레 무늬의 $\pm 0.0001\text{rad}$ 보다 작아진다.

Fig. 6은 본 연구로부터 개발된 알고리즘으로 모아레 신호의 위상 변화량을 계산하여 기준 정현 함수치에 대응시킨 결과이며, 4개의 정현파를 기준으로 하여 평균화된 1개의 정확한 정현 신호를 보여준다. 이는 모아레 무늬의 네 점에 대한 광강도 비교만을 통해 간섭 신호의 위상 변화량이 정확히 계산되며, 이 값은 외부의 기계적 진동이나 파형 변동에도 거의 영향을 받지 않음을 입증해 주는 결과이다.

변위량을 측정하기 위해 슬라이더 유닛을 원점으로부터 이동시키면서 정현적인 광강도의 위상 변화를 전술한 변위 연산식에 따라 계산하면 슬라이더 유닛이 이동한 절대 변위를 얻을 수 있다.

이 때, 얻어진 변위량의 정밀 정확도를 검증하기 위해 고정 유닛과 슬라이더 유닛상에 각각 코너큐브 프리즘(cornercubic prism)을 고정시켜 동일한 이송량을

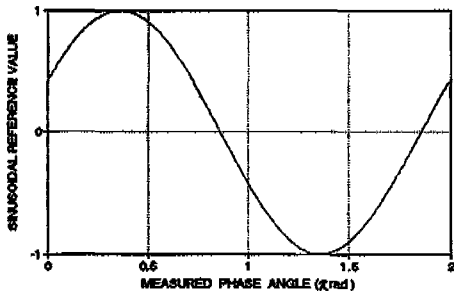


Fig. 6 Sinusoidal curve from four measured signals (by Four point method)

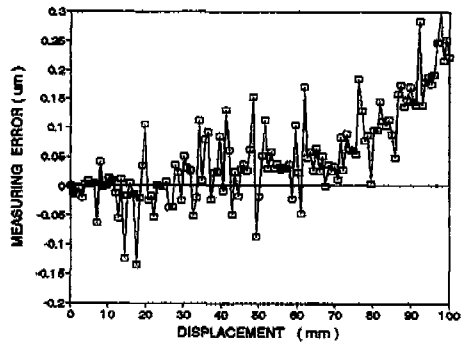


Fig. 7 Error curve of 1st experiment

레이저 간섭계(laser interferometer)⁸⁾로 동시 측정하였다. Fig. 7은 레이저 간섭계의 측정치를 이상적인 기준으로 취하고, 이상적 기준치와 모아레 무늬에 의한 연산 변위량과의 오차를 측정 길이 100mm에 대해 1mm간격으로 나타낸 것이다.

이 오차 곡선으로부터 알 수 있듯이 본 실험을 위해 제작한 측정 장치는 설정한 측정 범위에 대해 $+0.3\mu\text{m}$, $-0.05\mu\text{m}$ 의 오차 범위를 지니고 있음이 확인되었다.

그러나 이 그래프를 보면 측정 거리가 길어질수록 오차가 점점 증가하는 경향이 있음을 알 수 있는데, 이는 전체 측정 시간 동안의 온도 변화에 따라 리니어 스케일이 열팽창하여 그 상대 오차가 누적되었기 때문으로 여겨진다.

실험에서 사용한 리니어 스케일은 광학 석영 유리로서 온도 변위량은 약 $0.05\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 이고, 따라서 측정중 온도 변화가 심할 경우 긴 길이에 대해서는 이것이 큰 오차 요인으로 작용하게 될 것임은 자명하다.

이 문제는 리니어 스케일의 재료로서 인바(invar)계의 초불변강을 사용하여 반사형 모아레 광학계를 구성함으로써 동일 측정 범위에 대해 약 $0.01\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 의 온도 오차를 보장받는 것으로 어느 정도 해결될 수 있다.

그러나 대개의 경우 리니어 스케일과 피측정물의 열팽창 계수를 알 수 있으므로, 절대 열변위차 만큼을 기울기 보정을 통해 보상하는 온도 보정 방법을 적용하여 유사한 온도 환경하에서 재실험하였다.

Fig. 8은 두번째 실험의 측정 오차 곡선을 나타낸 그래프이다.

이 곡선으로부터 측정이 이루어 지는 동안 온도 변동에 따른 리니어 스케일의 열팽창량이 현저히 보상되었음을 알 수 있다. 즉, 온도 보상을 통해 비교적 긴 측

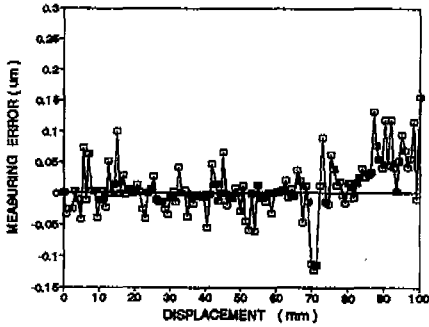


Fig. 8 Error curve of 2nd experiment
(The heat expansion of grating is numerically compensated)

정 범위에 대해서도 $\pm 0.15\mu\text{m}$ 이상의 고정밀 정확도가 보장되며, 이와 같은 결과에 주목해 볼 때, 정밀한 향은 시설이 구비되어 있지 않은 작업 현장에서도 본 측정 방법이 실용화될 수 있을 것으로 전망된다.

5. 결론

직선 변위에 따른 모아레 무늬의 위상 검출에 4점법을 적용하여 변위 측정 시스템을 구성하고 그 위치 검출 능력을 평가해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모아레 무늬의 0차 회절광 검출에 있어서 두 스케일의 간극 변동에 따른 검출오차를 소거하는데 4점법의 적용이 크게 기여할 수 있음을 보였다.

(2) 눈금 간격 $20\mu\text{m}$ 를 갖는 리니어 스케일의 눈금 신호를 모아레법을 통해 광학적으로 확대하고 이를 전기적으로 2000분할하여 $0.01\mu\text{m}$ 의 내삽 분해능을 얻었다.

(3) 본 연구에서 제안한 변위 측정법의 위치 검출 능력을 평가하기 위해 레이저 간섭계를 이용해 검출 오차를 비교 측정 한 결과, 그 오차는 측정 범위 100mm에

대해 $\pm 0.15\mu\text{m}$ 의 이내에 들고 있음을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 변위 측정법은 측정 소프트웨어의 개선을 통한 설계 변경이 용이하기 때문에, 앞으로 반도체 제조장치 및 3차원 측정기등 각종 초정밀 이송 제어 기계류에 대한 폭넓은 응용이 기대된다.

6. 참고문헌

1. 한 응교 외 5인, "He-Ne 레이저를 이용한 고정밀 리니어 스케일의 제작에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제8권, 제3호, pp.82-92, 1991.
2. Cesar A. Sciammarella, "The Moire Method-A Review," Experimental Mechanics, November, pp.418-433, 1982.
3. 安達 晃, 嬰井 好正, "4點法による干涉縞端數の自動測定," 1991年度 精密工學會春季大會學術講演會講演論文集, pp.393-394, 1991.
4. T.W.Park, T.Shimada, Y.Morimoto, E.K.Han, "Two-dimensional Strain Analysis by Fourier Transform Moire Interferometry," 1st FENDT Conf., 1991.
5. 內田 憲男 外4人, "二重回折格子による間隙變化に鈍感なマスクとウエハの位置合わせ法," 精密工學會誌, Vol. 54, No.10, pp.1951-1956, 1988.
6. 井澤 實, "精密位置決め技術-その計測テクニク-, " 工業調査會, pp.114-117, 1989.
7. D.C.Flanders and Henly I.Smith, "A new interferometric alignment technique," Applied Physics Letters, Vol.31, No.7, pp.426-428, 1977.
8. 長田 秀治 外1人, "直線運動精度の測定法について," 精密機械, Vol.51, No.6, pp.1257-1263, 1985.