

레이저 광원을 이용한 극미세 진동 측정장치에 관한 연구

(A Study on the Instrument Measuring
Microscopic Movements using a LASER Light Source)

姜聲喆* · 池哲根**

(Sung-Chul Kang · Chol-Kon Chee)

요 약

레이저 광원을 사용하여 정현적으로 극미세 진동하는 압전소자에 부착된 거울을 대상으로 마이켈슨 간섭계로 부터의 간섭신호를 감지해 변위의 크기와 주파수를 측정할 수 있는 진동측정 방법과 장치를 제시한다. 약 80(nm)~1.2(μ m) 범위의 진폭을 가진 물체의 변위와 주파수를 매우 높은 정밀도로 측정하고, 빔의 파장보다 큰 진동물의 간섭신호를 컴퓨터로 처리하여 진동형태의 개형을 구했다.

Abstract

A new signal processing system for microscopic displacement measurement in Michelson Interferometry is proposed. It measures amplitude and frequency of a sinusoidally vibrating object and in this study the displacement of a vibrating mirror mounted on a piezoelectric transducer is measured. Using it we could measure the amplitude and frequency of a object vibrating in range of about 80(nm)~1.2(μ m) with great accuracy. If the amplitude of a vibrating object is larger than the wavelength of LASER, we can obtain the pattern of vibration with the computer programs.

1. 서 론

정현적으로 진동하는 압전소자에 부착된 거울을 대상으로 마이켈슨 간섭계로부터 간섭 신호를 얻어, 진동체의 변위의 크기와 주파수를 측정할 수 있는 진동측정 방법과 장치를 제시한다. 즉, A/D 컨버터, 마이크로프로세서, 그리고 아날로그 회로 등으로 구성되는 간섭신호 감지기(Interference signal Peak Detector)를 제작하고, 이를 이용

하여 신호처리하므로써 전형적인 방법들보다 훨씬 더 짧은 지연시간(Delay Time)을 갖고 측정하는 것이 가능하다. 또한, 측정물의 진동진폭이 빔의 파장보다 크면 이 신호를 컴퓨터로 처리하여 진동형태(Pattern)의 개형을 구할 수 있다.

2. 이 론

2.1. 광학계로부터의 신호 감지

그림 1의 마이켈슨 간섭계에서 M1, M2 두 거울에 반사된 두 빔 사이의 광경로차(Optical Path Difference) Δz 는

*正會員: 서울대 大學院 電氣工學科 博士課程

**正會員: 서울대 電氣工學科 教授 · 工博

$$\Delta z = 2D_0 \cos \theta \quad (1)$$

이다. 여기서 θ 는 시스템의 축과 빔이 관측되는 축 사이의 각도이다. 광축이 정확히 일치한다면 $\theta = 0^\circ$ 이고, 만일 M2가 시간에 따른 함수 $r(t)$ 로 광축에 대해 수직으로 진동한다면 광경로차의 시간에 따른 변화 $\Delta z(t)$ 는

$$\Delta z(t) = 2[D_0 + r(t)] \quad (2)$$

가 되므로 두 빔 사이의 위상차(Phase Difference) δ 는

$$\begin{aligned} \delta &= 2\pi/\lambda \times \Delta z(t) \\ &= 2\pi/\lambda \times \{2[D_0 + r(t)]\} \end{aligned} \quad (3)$$

이다. 빛의 파동성에 기인하여 위의 위상차가 프린지(Fringe)를 형성하게 한다. 음의 z방향으로 움직이는 빔은

$$E(z, t) = E_0 \exp[i(kz + \omega t + \phi)] \quad (4)$$

인 함수로 표시할 수 있다. 여기서 E_0 는 파의 진폭을 나타내고 ω 는 각주파수, 그리고 k 는 $2\pi/\lambda$ 이며 λ 는 빔의 파장이다. 함수 ϕ 는 파의 위상을 나타내며 일반적으로 위치와 시간의 함수이다. M1과 M2로부터의 두 빔은 중첩되어 빛의 세기(Intensity)는 다음의 S로 주어진다.

$$S = |E_1 \exp[i(k_1 z_1 + \omega_1 t + \phi_1)] + E_2 \exp[i(k_2 z_2 + \omega_2 t + \phi_2)]|^2 \quad (5)$$

단색광이고 가간섭적인 레이저광에 대해서 k , ϕ 를 상수로 놓을 수 있으므로 $\phi_1 = \phi_2 = \phi$, $k_1 = k_2 = k$ 이고, 도플러(Doppler) 효과가 없다면 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 이다. 이 조건 하에서 위의 식을 연산하면

$$S = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos k \Delta z \quad (6)$$

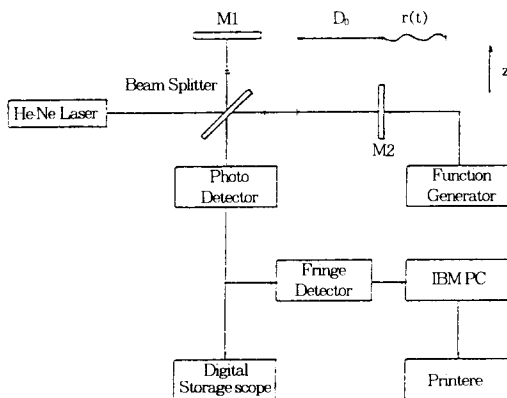


그림 1. 실험장치 구성도

Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Arrangement

가 되고, 여기서 $E_1^2 + E_2^2$ 는 PD에 의해 감지되는 전압의 직류성분이다. 거울 M2를 정현적으로 진동시킴으로써

$$r(t) = b \cos \omega t \quad (7)$$

를 얻는다면, 시간에 따른 광경로차는

$$\Delta z(t) = 2[D_0 + b \cos \omega t] \quad (8)$$

에 의해 주어진다.

빛의 세기에 대해 선형적으로 반응하는 PD에 의해 감지되는 빛의 세기의 교류성분의 시간적 변화 $S(t)$ 는

$$\begin{aligned} S(t) &= 2E_1 E_2 \cos k \Delta z(t) \\ &= S_0 \cos k \{2[D_0 + b \cos \omega t]\} \end{aligned} \quad (9)$$

가 되고 이를 전자회로적으로 처리한다. 여기서 S_0 는 교류 성분의 진폭으로서 두 빔이 동일 광원에 의한 것이고 광경로차에 의한 광량의 손실은 무시할 수 있으므로 $E_1 = E_2 = E$ 가 되어 E^2 이다.

2.2 간섭 신호 해석

식 (3)과 식 (9)에서 $S(t)$ 는 $\delta = (2m+1)\pi$ 일 때 최소이고, $\delta = 2m\pi$ 일 때는 $S(t)$ 는 최대가 된다. 즉, 소멸간섭의 경우는

$$\Delta z = (2m+1) \times \lambda/2 \quad (10)$$

이고, 보강간섭의 경우는

$$\Delta z = 2m \times \lambda/2 \quad (11)$$

가 된다. 본 논문에서는 극대치에서 극대치까지를 한 개의 프린지로 정한다. M2의 빔-스플리터로부터의 거리가 최대 또는 최소일 때는 물체의 속도가 최소가 되어 프린지가 소(疎)하고, M2가 M1과의 차가 D_0 되는 지점을 통과할 때는 속도가 최대가 되어 프린지가 밀(密)하게 된다.

식(10)과 식(11)에서 M1과 M2사이의 경로차가 빔의 파장 λ 만큼씩 변화할 때, $S(t)$ 는 극대치에서 극소치로 변하고 다시 극대치로 변화한다. 즉, 경로차는 거울의 움직이는 크기의 두 배이므로 $\lambda/2$ 만큼씩의 거울의 움직임에 대해 새로운 프린지가 형성된다. 간섭신호의 한 주기가 측정물의 주기이고, 한 주기 동안에 물체는 $4b$ 만큼의 변위차를 갖게되므로 한 주기의 총 광경로차는 $8b$ 가 된다. 이에 포함된 프린지의 갯수가 n 개이면 결국

$$b = (n \times \lambda)/8 \quad (12)$$

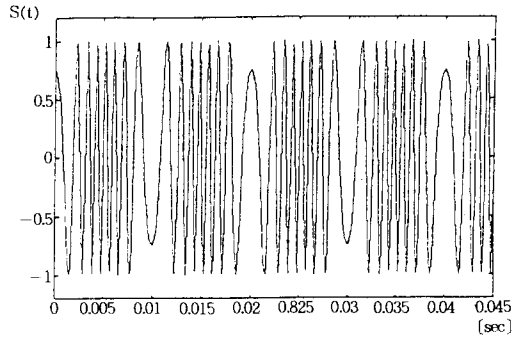
이 된다.

식(9)에서 $S_0=1$ 로 하여 컴퓨터로 계산된 두 경우의 $S(t)$ 를 그림 2에 보였다. 본 논문의 실험에 사용된 He-Ne LASER의 λ 는 632.8(nm)이므로, 식(12)에 의해 (a)의 경우 $n=15$ 이므로 $b=1186.5(\text{nm})$ 이고, (b)의 경우 $n=1$ 이므로 $b=79.1(\text{nm})$ 이다.

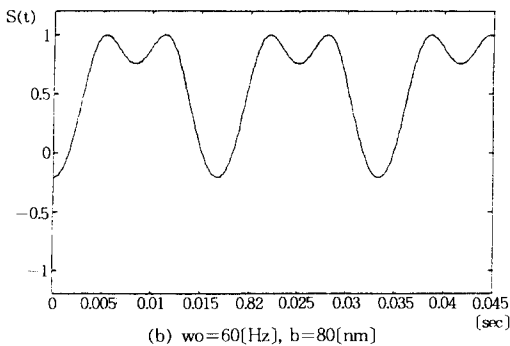
한편 진동 형태(Pattern)는 한 프린지가 형성되는 시간에 관계되므로 프린지가 극치에서 다음 극치가 되는 시간(Δt)을 x축으로 하여 그때마다 $\lambda/2$ 만큼씩 증감시킨 값을 y축에 대응시키면 프린지의 개형을 얻을 수 있다.

3. 신호처리

A/D 컨버터, 마이크로프로세서, 그리고 아날로그 회로 등으로 구성되는 간섭신호 Peak 감지기 (Interference signal Peak Detector)의 구성도를 그림 3에 보였다.



(a) $\omega_0=50[\text{Hz}]$, $b=1.2[\mu\text{m}]$



(b) $\omega_0=60[\text{Hz}]$, $b=80[\text{nm}]$

그림 2. 계산에 의한 간섭신호

Fig. 2. Interference Signal by Calculation

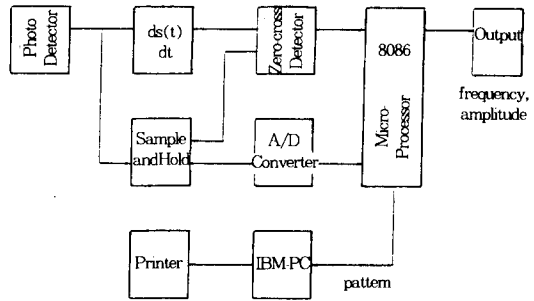
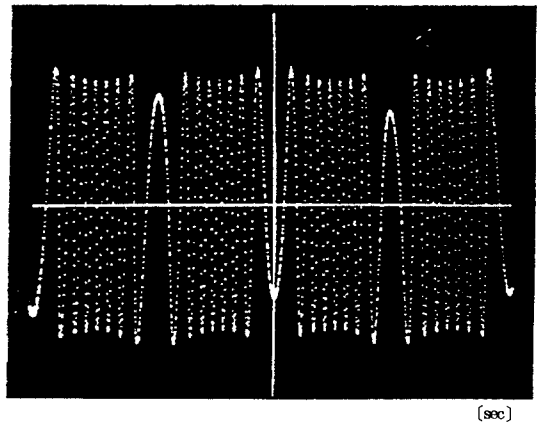
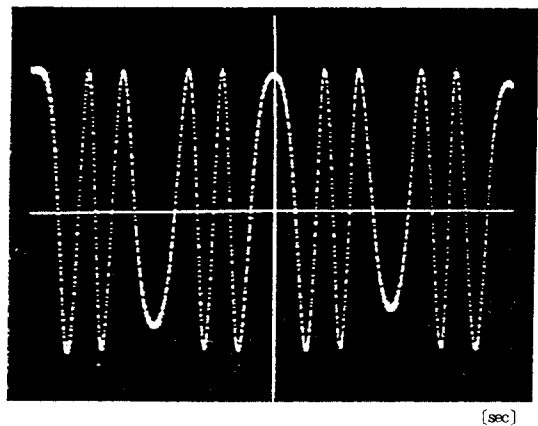


그림 3. 간섭신호 Peak 감지기 구성도

Fig. 3. Schematic Diagram of Interference signal Peak Detector



(a) $\pm 400[\text{mV}]$



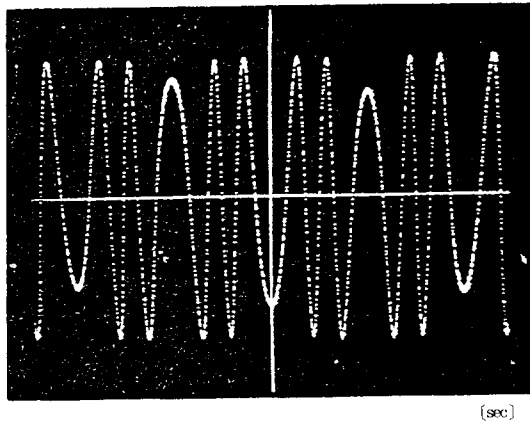
(b) $\pm 200[\text{mV}]$

그림 5. 50Hz인가시 진폭에 따른 간섭무늬의 변화

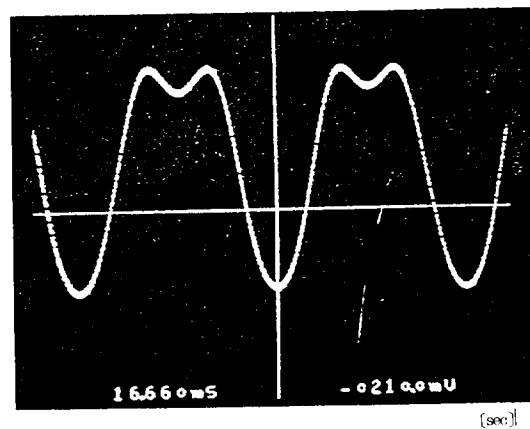
Fig. 5. Fringe Pattern by Change of Amplitude at 50Hz

미분회로를 통하여 PD에 감지된 신호를 증폭하고 직류성분을 제거한 $S(t)$ 를 미분한다. 영점 감지기(Zero-cross Detector)로 $ds(t)/dt$ 가 영이 되는 순간, 즉 프린지가 극치(Peak)를 형성할 때의 신호를 샘플링하여 A/D 컨버터로 입력한다. A/D 컨버터에 의해 256등분 된 $S(t)$ 와 그 때의 상대시간이 8086에 의해 RAM에 저장된다. 이 때 상대시간은 8086의 시스템 클럭의 정수배를 의미한다.

진동체의 한주기가 입력되는 시간이 충분히 경과된 후 8086은 저장된 간섭신호의 극치(peak)에 대한 데이터를 해석하여 주기와 프린지의 갯수를 계산하는 프로그램을 실행시켜 프린지 갯수



(a) $\pm 400(\text{mV})$



(b) $\pm 80(\text{mV})$

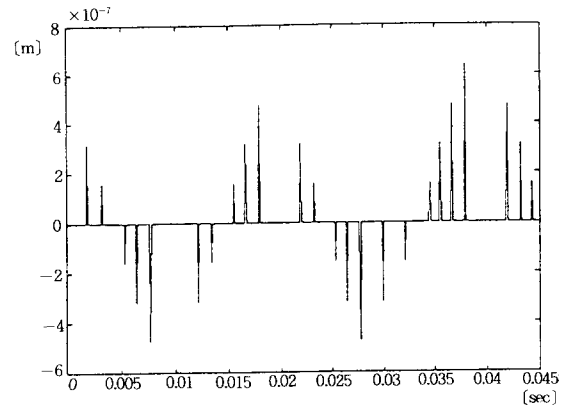
그림 6. 60Hz인가시 진폭에 따른 간섭무늬의 변화
Fig. 6. Fringe Pattern by Change of Amplitude at 60Hz

와 시스템 클럭의 갯수를 LED 7Segment로 출력한다.

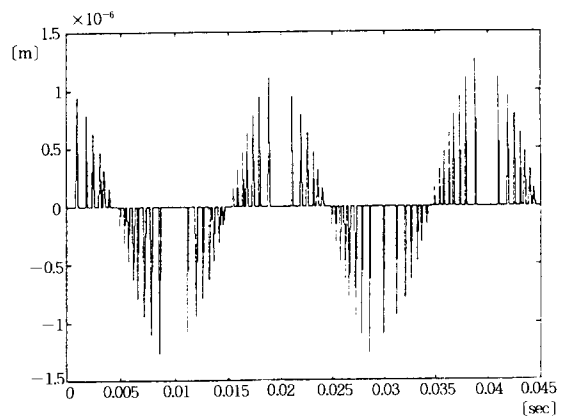
한편, 8086의 RAM에 저장된 데이터를 IBM-PC로 전송하여 2.2절에서 설명된 기능을 하는 프로그램으로 진동형태(Pattern)의 개형을 얻을 수 있다.

4. 실험 및 결과

실험 장치 구성도는 그림 1에 보였다. 광원은 최대 출력 5(mW), 파장 632.8(nm)인 He-Ne LASER이고 측정물은 거울이 부착된 압전소자(Piezoelectric Transducer)이다. 주문제작한 압전소자의 진동 특성이 그림 4에 보여졌다. 전자기



(a) $\omega_0=50(\text{Hz}), \pm 200(\text{mV})$ 인가



(b) $\omega_0=50(\text{Hz}), \pm 400(\text{mV})$ 인가

그림 7. 프린지 감지기로부터 전송된 데이터로부터의 진동 패턴

Fig. 7. Vibration Pattern obtained by transferred Data

원리를 이용한 Gap Sensor로 정현적인 진동이 가능한 범위를 측정한 것으로 (a)의 경우 1.2(μm), (b)의 경우 110(nm)의 진폭이 측정되었고, 이 범위 안에서 정현적으로 정확히 진동하였다. 그림 5와 그림 6에 각각 50(Hz), 60(Hz)의 경우에 입력 전압을 달리하여 다른 진폭의 진동에서의 간섭무늬 변화를 보였다.

특히, 그림 5의 (a)와 그림 6의 (b)의 경우에 프린지 갯수가 각각 15개, 1개씩 감지되었고 이는 식(12)에 의해 1186.5(μm), 79.1(nm)로 측정되어 그림 2의 계산에 의한 간섭무늬와 일치하였다. Gap Sensor에 의한 측정과는 프린지의 갯수가 작게 형성될수록 즉, 진폭이 파장의 1/8에 가깝게 작아질수록 오차가 크게 나타났다.

한편, 그림 5의 (a)와 (b)의 경우의 진동형태(Pattern)가 그림 7에 보여졌다. (b)보다 작은 범위의 진동형태는 샘플링 데이터가 부족하여 정현모양의 형태를 구하기 힘들었다. 측정물의 진폭이 더 커지면 좀 더 정확한 모양의 정현진동을 얻을 수 있다.

5. 결 론

LASER 광원을 사용하는 간섭계로 정현적으로 진동하는 대상물로부터 간섭무늬를 얻고 이 신호의 극치를 감지하는 장치 즉, A/D 컨버터, 마이크로프로세서, 그리고 아날로그 회로 등으로 구성되는 간섭신호 Peak 감지기(Interference signal Peak Detector)를 설계, 구성하고 이로부터 80(nm)~1.2(μm) 범위의 진폭을 가진 물체의 진폭과 주기를 매우 높은 정밀도로 측정할 수 있다. 이 장치는 전형적인 방법들보다 훨씬 더 짧은 지연시간(Delay Time)을 갖는다. 또한 진폭이 500(nm)~1.2(μm)인 범위의 진동에 대해 정현적인 진동형태를 얻을 수 있었다. 좀 더 큰 진폭을 가지고 정현적으로 진동하는 대상물일수록 정확한 진동형태를 얻을 수 있게 된다.

LASER 광원의 출력이 변조가능하면 빔의 파장의 교란(Disturbance) 효과를 이용하여 간섭신호를 정현위상변조신호와 동기화시키고 특정 시간에서 신호를 샘플링하여 캐리어(Carrier) 성분

을 제거시키는 방법을 사용하면 프린지의 극치(Peak) 이외의 시각에서의 해석도 실시간으로 가능하게 되며 보다 넓은 범위에서 정확한 진동형태를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) C. Flytanis, J. L. Oudar, Nonlinear Optics: Materials and Devices, Springer-Verlag, 1985.
- 2) G. E. Sommargren, "Optical Heterodyne Profilometry", Appl. Opt. 20, 610-618, 1981.
- 3) Joseph T. Verdeyen, Laser Electronics second edition, Prentice-Hall, 1989.
- 4) N. Bloembergen, Nonlinear Optics, W. A. Benjamin, Inc., 1965.
- 5) O. Sasaki, H. Okazaki, "Analysis of Measurement Accuracy in Sinusoidal Phase Modulating Interferometry", Appl. Opt. 25, 3152-3158, 1986.
- 6) O. Sasaki, T. Yagiuchi, "Sinusoidal Phase Modulating Interferometry", Jpn. J. Opt. 15, 25-30, 1986.
- 7) S. Ueha, K. Shiota, T. Okata and J. Tsujiuchi "Optical Heterodyne Measurement of InPlane Vibrations", Opt. Commun. 10, 88-90, 1974.
- 8) W. Pushert, "Optical Detection of Amplitude and Phase of Mechanical Displacements in the Angstrom Range", Opt. Commun. 10, 357-361, 1974.
- 9) R. Crane, "Interference Phase Measurement", Appl. Opt. 8, 538, 1969.
- 10) K. D. Stumpt, "Real-Time Interferometer," Opt. Eng. 18, 648, 1979.
- 11) Y. H. Kim, D. H. Lee, "Absolute Measurement of Dynamic Micro-displacements by Laser Interferometry", Korean Appl. Opt. 3, 461-465, 1990.
- 12) N. A. Massie, "Real-Time Digital Heterodyne Interferometry: a System", Appl. Opt. 19, 154, 1980.

◇ 著者紹介 ◇



강 성 철 (姜聲喆)

1968年 1月 8日生. 1990年 서울대 電氣工學科 卒業. 1992年 서울대 大學院 電氣工學科 卒業(碩士). 現在 서울대 大學院 電氣工學科 博士課程.