

<論 文>

# 고감도 레이저 간섭계를 이용한 미소 진동진폭의 정밀측정

서 상 준\*

(1988년 2월 3일 접수)

## Ultrasensitive Laser Interferometer for Precision Measurement of Small Vibration Displacement

Sang Joon Suh

**Key Words :** Interferometer(간섭계), Vibration(진동), Curve Fitting(곡선맞춤), Computer Simulation(컴퓨터 모의실험), Calibration(교정), Multiple Reflection(다중반사)

### Abstract

Small vibration displacements may be measured by optical interferometers, based on the Michelson method. The standard Michelson interferometer works well when the mirror displacements are relatively large compared to the optical wavelength. But it does not work for displacements less than approximately a quarter of optical wavelength. Several multiple reflection laser interferometers, simply modified standard Michelson interferometer, have been developed to decrease the minimum detectable limits. Among these a relatively simple and easy multiple reflection system is used to measure the small vibration displacements. This multiple reflection system is constructed with a right angle prism and a convex lens. Therefore this system makes it possible to measure a vibration displacement of the small area on the vibrating structure. The fringe interpolation method and curve fitting method are used to determine accurately the small vibration displacements from the measured interference fringe patterns. Also computer simulation technique is used to check the accuracies of these methods. According to the results of the computer simulation technique, the curve fitting method is more accurate than the fringe interpolation method. The optically measured results are in good agreement with those of the standard accelerometer with high accuracy and it is possible to measure the peak vibration displacement as small as 9.01nm using multiple reflection system and curve fitting method.

————— 기 호 설 명 —————	
$C$	: 상수
$d(t), d$	: 진동체의 진동진폭(nm)
$d_0$	: 진동체의 최대진폭(nm)
$E(x, t), E_1, E_2$	: 광파의 진폭
$E_0$	: 광파의 최대진폭
$F$	: 렌즈의 초점거리(mm)

$f$	: 진동 주파수(Hz)
$g$	: 중력가속도(m/sec <sup>2</sup> )
$h$	: 입사광선의 입사고(mm)
$I(t), I_p, I_q$	: 광세기
$j$	: 허수, $\sqrt{-1}$
$K$	: 상수
$k$	: 광파의 파동상수
$l_1, l_2$	: 광분파기로부터 반사경까지의 거리 (mm)

\* 정회원, 한국표준연구소 음향연구실

- $\ell_0 = \ell_2 - \ell_1$  : 광로차(mm)
- $M$  : 진동의 한 주기당 간섭신호 측정점의 수
- $m$  : 간섭무늬 수
- $N, N_s$  : 진동의 한 주기당 간섭무늬 수
- $n$  : 광파의 반사회수
- $R_1, R_2$  : 광파의 감쇠량
- $S$  : 변위감도
- $t$  : 시간(sec)
- $Z(t)$  : 진동진폭 변화에 따른 위상(rad)
- $Z_{total}, Z_p, Z_q$  : 위상값(rad)
- $\alpha, \alpha_i$  : 광파의 입사각(rad)
- $\sigma$  : 광경로의 변화량(nm)
- $\epsilon$  : 간섭무늬 수 측정오차(%)
- $\theta$  : 광로차에 의한 위상(rad)
- $\lambda$  : 광파의 파장(nm)
- $\sigma_D$  : 진폭값의 표준편차(nm)
- $\sigma_R$  : 정규분포를 갖는 우연오차의 표준편차, 간섭신호 측정값의 표준편차
- $\omega$  : 광파의 각주파수(rad/sec)
- $\Omega$  : 진동 각주파수(rad/sec)

### 1. 서 론

미소한 진동진폭의 정밀한 측정을 위해서는 일반적으로 광학적 간섭원리를 이용한 Michelson간섭계를 이용한다. 간섭계에서 나타나는 간섭무늬 하나의 이동은 광원의 반파장에 해당하는 변위를 나타내므로 진동진폭이 광원의 파장에 비해 상당히 큰 경우에는 간섭무늬의 수를 셀으로써 진동진폭을 측정할 수 있다. 그러나 진동진폭이 파장의 1/4 또는 그 이하가 되면 간섭무늬 수를 세는 방법으로는 정확한 진동진폭의 측정이 어려워진다. 이를 해결하기 위해 복잡한 전자장치에 의한 신호안정화 장치를 도입하거나<sup>(1-3)</sup> 다중반사계를 간섭계에 도입하여 진동체에서 반사회수를 늘려줌으로써 Michelson간섭계의 변위측정한계를 낮추는 방법이 있다.<sup>(4-7)</sup>

본 연구에서는 미소한 진동진폭의 정밀한 측정을 위해 비교적 광선정렬(optical alignment)이 쉽고 광손실이 적으며 국소부위의 진동측정이 가능한 다중반사계<sup>(7)</sup>를 Michelson간섭계에 도입하였다. 미소 진동진폭의 정밀한 값을 결정하기 위해서는 간섭신호를 측정하여 간섭무늬 보간법<sup>(8)</sup>과 곡선 맞춤법<sup>(9)</sup>을 이용하는 방법이 있다. 전자는 간단한 계산

과 시간을 절약할 수 있는 반면 후자는 복잡한 계산으로 인해 많은 시간이 소요된다. 그러나 정밀계 측정비의 교정에서와 같이 경우에 따라서는 많은 시간과 노력이 소요되더라도 정밀한 측정결과를 얻어야 할 필요가 있기 때문에 이들 두가지 방법의 정밀도를 확인하기 위해 컴퓨터에 의한 모의실험을 수행하였다.

모의실험 결과에 의하면 미소한 진동진폭을 측정하는데 있어 간섭무늬 보간법보다는 곡선 맞춤법에 의한 결과가 정밀도가 높은 것으로 나타났으며 실제 표준가속도계로 측정된 결과와도  $\pm 0.5\%$  이내에서 일치하는 것을 보았다. 또한 간섭계의 정밀한 광선정렬을 통해 반사회수를 15회까지 증가시켜 간섭신호를 측정된 후 곡선 맞춤법에 의해 계산한 결과 9.10nm의 진동진폭을 측정할 수 있었다.

### 2. 간섭이론

진동체의 진폭 측정에 사용되는 일반적인 간섭계는 Michelson간섭계로서 그 구성은 Fig. 1에서 보는 것과 같다. 광원으로부터 나온 광파는 광분파기 (beam splitter)에 의해 두개로 분할된다. 그중 하나는 고정된 반사경에 의해 반사된 후 다시 광분파기를 통하여 광검출기로 가며 나머지 하나는 진동체에 부착된 반사경에서 반사된 후 광분파기를 거쳐 광검출기에 도달한다. 만약 광원으로부터 출발한 광파가 가간섭성을 갖는 경우 두 광파는 광검출기의 표면에서 간섭을 일으키게 된다.

광원으로부터 나온 광파를 다음과 같이 표현하자.

$$E(x, t) = E_0 \exp j(kx - \omega t) \quad (1)$$

여기서  $k = 2\pi/\lambda$ 는 파동상수,  $\omega$ 는 광파의 각주파수,  $\lambda$ 는 광파의 파장이다. 광분파기로부터 고정된 반사경까지의 거리를  $\ell_1$ , 진동하는 반사경까지의 거리를  $\ell_2$ 라고 하면 광검출기 표면에서 두 광파는

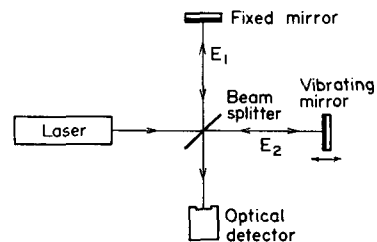


Fig. 1 Michelson interferometer

각각 다음과 같이 표현된다.

$$E_1 = R_1 E_0 \exp j(2k\ell_1 - \omega t) \quad (2)$$

$$E_2 = R_2 E_0 \exp j\{2k(\ell_2 - d(t)) - \omega t\} \quad (3)$$

여기서  $R_1$ 과  $R_2$ 는 각각의 광경로에서 발생하는 광파의 감쇠를 나타내며  $d(t)$ 는 진동체의 진동진폭으로서 다음과 같이 정현진동을 한다고 하자.

$$d(t) = d_0 \cos(\Omega t) \quad (4)$$

여기서  $\Omega = 2\pi f$ 이며  $f$ 는 진동주파수이다.

이들 두 광파가 광검출기의 표면에서 중첩되어 나타나는 광세기는 결국 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} I(t) &= C |E_1 + E_2|^2 \\ &= CE_0^2 \{R_1^2 + R_2^2 + 2R_1 R_2 \cos[2k(\ell_2 \\ &\quad - \ell_1 + d(t))]\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $C$ 는 상수로서  $0 \leq C \leq 1$ 의 값을 갖는다. 만약 두 광경로에서 발생하는 광손실이 같다면 ( $R_1 = R_2$ ) 식(5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} I(t) &= K \{1 + \cos(\frac{4\pi}{\lambda} [\ell_0 + d_0 \cos(\Omega t)])\} \\ &= K \{1 + \cos(\frac{4\pi}{\lambda} d_0 \cos(\Omega t) + \theta)\} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $K$ 는 임의의 상수,  $\ell_0 = \ell_2 - \ell_1$ 은 광로차(OPD; optical path-length difference)이며  $\theta = \frac{4\pi}{\lambda} \ell_0$ 은 광로차에 의한 위상이다.

식(6)에서 알 수 있듯이 두 광파의 간섭에 의한 광세기는 진동변위에 따라 최대값과 최소값 사이에서 변하게 된다. 이것은 화면상에 밝고 어두운 무늬로 나타나는데 이것을 간섭무늬라고 한다.

### 3. 간섭계에 의한 진동진폭 측정원리

#### 2.1 간섭무늬 수 측정법(Fringe Counting Method)

식(6)에서 두 광파의 광로차가 일정하다면 간섭무늬의 수는 진동진폭  $d(t)$ 에 따라 변하게 되며 진동진폭이  $\lambda/2$ , 즉 광파의 반파장만큼 이동할 때 마다 간섭무늬가 하나씩 변하게 된다.

정현진동을 하는 진동체의 최대 진동진폭이 식(4)에서와 같이  $d_0$ 라고 하면 진동체에 부착된 반사경이 진동의 한 주기동안 이동한 전체 거리는  $4d_0$ 가 되며 이 주기동안 변한 간섭무늬의 수는  $8d_0/\lambda$ 가 된다. 이와같이 진동의 한 주기동안 변한 간섭무늬의 수를 셈으로서 진동진폭을 결정할 수 있다. 즉 한 주기동안 변한 간섭무늬의 수를  $N$ 이라고 하면 진동진폭  $d_0$ 는 다음과 같이 주어진다.

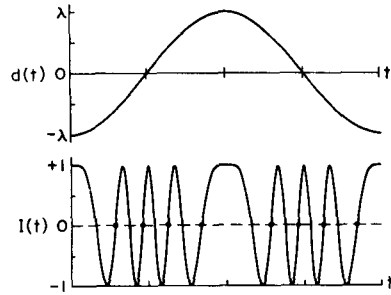


Fig. 2 Vibration amplitude and interference fringe for  $d_0 = \lambda$

$$d_0 = \lambda N / 8 \quad (7)$$

Fig. 2는 진동진폭의 시간에 따른 변화와 이때 측정된 간섭무늬의 형태를 보여준다. Fig. 2에서는 진동진폭이 광파의 파장과 같은 경우이므로 간섭무늬 수가 8이 된다.

그러나 실제에 있어서는 진동진폭이  $\lambda/2$ 의 정수 배로 주어지지 않는 경우가 대부분이다. Fig. 3과 같이 진동진폭  $d_0$ 가  $9\lambda/8$ 인 경우 광로차에 따른 위상값  $\theta$ 에 따라 전혀 다른 간섭무늬 형태가 주어진다. Fig. 3(a)는 위상이 0 rad인 경우이고 (b)는 위상이  $\pi/2$  rad인 경우이다. Fig. 3(a)에서는 간섭무늬 수를 세기 위한 기준점에 따라 간섭무늬 수가 8 또는 10이 된다. 한편 Fig. 3(b)에서는 기준점에 관계없이 9가 된다. 따라서 간섭무늬 수 측정 방법에서는 항상 진동의 한 주기당  $\pm 2$ 의 간섭무늬 수 오차가 발생하게 된다. 그러므로 간섭무늬 수 측정방법에 의해 계산된 진동진폭의 오차  $\epsilon$ 은 다음과 같이 주어진다.

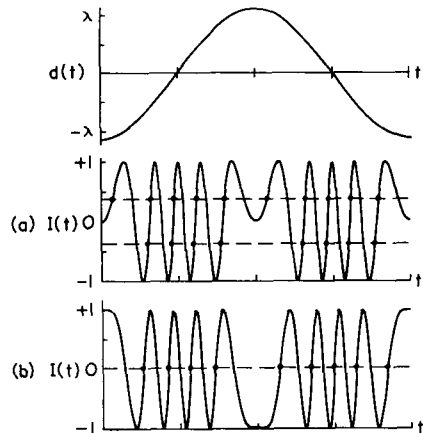


Fig. 3 Vibration amplitude and interference fringe for  $d_0 = 9\lambda/8$ , (a)  $\theta = \pi/2$  rad

$$\epsilon = \pm \frac{2}{N} \times 100 = \pm \frac{\lambda}{4d_0} \times 100(\%) \quad (8)$$

따라서 간섭무늬 수 측정방법에서 발생하는 오차를 줄이기 위해서는 진동진폭  $d_0$ 가 광파의 파장  $\lambda$ 에 비해 충분히 커야한다.

### 3.2 간섭무늬 보간법(Fringe Interpolation Method)

간섭무늬 수 측정방법으로는 간섭무늬 수를 측정하는데서 발생하는  $\pm 2$ 의 오차로 인해 미소한 진동진폭의 측정에는 적용할 수 없다. 이러한 문제를 극복하기 위한 방법중의 하나가 간섭무늬 보간법이다<sup>(8)</sup>.

Fig. 4는 식(6)에서 위상이 다른 경우에 나타나는 간섭무늬를 보여준다. Fig. 4에서 진동진폭  $d_0$ 는 700nm로 하였으며 (a)의 위상은 0 rad, (b)는  $\pi/2$  rad, (c)는 0.5rad이다. Fig. 4에서 보듯이 동일한 진동진폭에 대해서도 위상에 따라 서로 다른 간섭무늬 수를 갖게된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 간섭무늬 보간법에서는 간섭무늬 수 뿐만 아니라 점  $p$ 와 점  $q$ 에서의 광세기도 진동진폭을 계산하는데 사용된다.

점  $p$ 와 점  $q$ 는 진동진폭의 최대점 또는 최소점에 해당되는 점이며 이 점에서의 광세기를 각각  $I_p$ 와  $I_q$ 라고 하자. 편의상 광세기의 최대값을 +1이라 하고 최소값을 -1이라고 하면 식(6)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

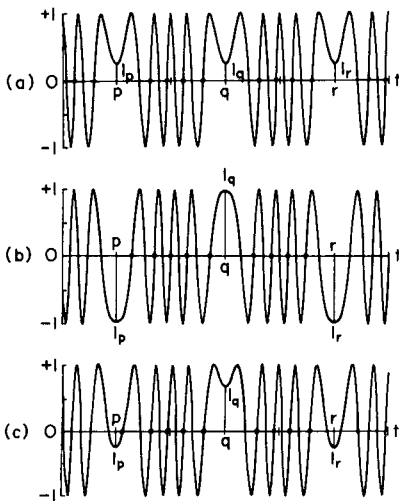


Fig. 4 Interference fringes for various phase values, (a)  $\theta=0$ , (b)  $\theta=\pi/2$ , and (c)  $\theta=0.5$ rad

$$I(t) = \cos(Z(t))$$

$$Z(t) = \frac{4\pi}{\lambda} d_0 \cos(Qt) + \theta \quad (9)$$

이 경우 위상값  $Z(t)$ 가  $2\pi$ 만큼 변함에 따라 간섭무늬 수가 하나씩 변하게 된다. 그러나 Fig. 4(c)의 점  $p$ 에서와 같이 중심선에서 보았을 때 곡선이 오목한 경우에는 광세기  $I(t)$ 가 최대값 (또는 최소값)에 도달하기 전에 다시 되돌아 간다. 따라서 위상값  $Z(t)$ 의 변화량은  $2\pi$ 보다 작음에도 불구하고 간섭무늬는 하나로 간주된다. 그러므로 점  $p$ 에서는  $Z(t)$ 의 위상 변화량  $\arccos |I_p|$ 가  $2\pi$ 보다 작은 값을 갖는다.

한편 동일한 그림에서 점  $q$ 는 중심선에서 보았을 때 볼록한 곡선을 갖는다. 이점에서의 광세기는 최대점(또는 최소점)에 도달한 후 감소하다가 최소점(또는 최대점)에 도달하기 전에 다시 되돌아 간다. 이 경우  $Z(t)$ 의 위상 변화량은 분명히  $2\pi$ 보다 큰 값을 갖는다. 그럼에도 불구하고 간섭무늬 수는 하나로 간주되기 때문에 이 점에서  $Z(t)$ 의 위상 변화량  $\arccos |I_q|$ 는  $2\pi$ 보다 크다.

따라서 간섭무늬 수가  $N$ 인 경우  $Z(t)$ 의 전체 위상값은 다음과 같이 주어진다.

$$Z_{total} = 2\pi N \pm 2Z_p \pm 2Z_q$$

$$Z_p = \arccos |I_p|, Z_q = \arccos |I_q| \quad (10)$$

이것을 간섭무늬 수로 나타내기 위해서는  $2\pi$ 로 나누면 된다.

$$N_s = \frac{Z_{total}}{2\pi} = N \pm \frac{Z_p}{\pi} \pm \frac{Z_q}{\pi} \quad (11)$$

식(11)로 부터 진동진폭  $d$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$d_0 = \frac{\lambda}{8} N_s = \left( N \pm \frac{Z_p}{\pi} \pm \frac{Z_q}{\pi} \right) \quad (12)$$

이 식에서  $\pm$ 부호는 앞에서 언급하였듯이 중심선에서 보았을때 간섭무늬의 곡선이 오목한 경우에는 -, 볼록한 경우에는 +가 된다.

### 3.3 곡선 맞춤법(Curve Fitting Method)

진동진폭이 작아서 간섭무늬의 수가 한개 내지 두개 또는 그 이하가 되어 간섭무늬 수 측정방법을 적용하기 어려울 경우 이를 해결하기 위한 또 다른 방법중의 하나가 곡선 맞춤법이다<sup>(9)</sup>.

간섭계에 의해 나타나는 간섭무늬의 형태는 식(6)과 같이 간결하게 표현되므로 측정된 간섭무늬의 형태를 수식과 비교함으로써 식(6)의 진폭  $d_0$ 와 위상  $\theta$ 를 정확하게 결정할 수 있다. 수식과의 비

교를 위해 측정된 간섭신호를 규격화(최대값 = +1, 최소값 = -1)하여 식(9)로 주어지는 간섭신호와 비교하면 비교적 간단하게 변수  $d_0$ 와  $\theta$ 를 결정할 수 있다.

4. 다중반사계

일반적인 Michelson간섭계를 이용하여 미소 진동변위를 측정하는데는 한계가 있다. 그러나 탐사광(probe beam)이 진동체에서 여러번 반사를 하게 되면 미소한 진동이라도 반사회수가 증가함에 따라 광경로의 변화량이 커지게 되므로 정밀측정이 가능하다.

탐사광을 진동체에서 여러번 반사시키기 위한 방법에는 여러가지가 있다(4-7). 가장 간단한 방법으로는 Fig. 5에서 보듯이 반사면 위에 또 하나의 반사경을 평행으로 설치하여 진동면에서 여러번 반사를 시키는 것이다.

Fig. 5에서는 간단하게 진동면에서 2번 반사하는 경우를 예로 들었다. 입사광의 입사각을  $\alpha$ 라 하고 진동체의 변위를  $d$ 라고 하면 진폭  $d$ 에 의한 광경로의 변화량  $\delta$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta = 4d / \cos \alpha \tag{13}$$

이와같은 다중반사계에서 반사회수를  $n$ 으로 증가시키면  $\delta$ 는 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\delta = 2dn / \cos \alpha \tag{14}$$

식(14)에서 알 수 있듯이 반사회수  $n$ 을 증가시키면 진동체의 진동진폭  $d$ 가 작더라도  $\delta$ 를 증가시킬 수 있기 때문에 미소 진동진폭의 정밀측정이 가능하다.

동일한 진동변위에 대해 다중반사 간섭계에서 나타나는 간섭무늬 수와 간단한 Michelson간섭계( $n=1$ )에서 나타나는 간섭무늬 수의 비를 변위감도(displacement sensitivity)라고 하면 Fig. 5와 같은 다중반사계의 변위감도  $S$ 는 식(14)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$S = \frac{m}{2d/(\lambda/2)} = \frac{n}{\cos \alpha} \tag{15}$$

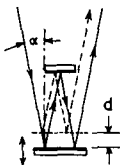


Fig. 5 Folded-beam multiple reflection system.

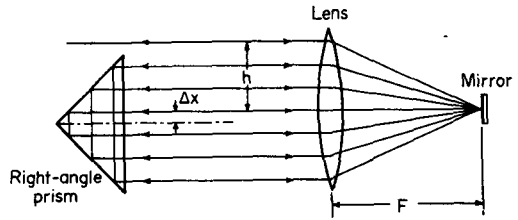


Fig. 6 Multiple reflection system with a right angle prism and a lens

여기서  $m = \delta / (\lambda/2)$ 는 진동체가 변위  $d$ 만큼 이동할 때 발생하는 간섭무늬 수이다.

이와같이 다중반사계를 사용하면 실제 진동변위가 아닌 겉보기 진동변위(apparent vibration displacement)를 측정하게 되는데 겉보기 진동진폭을 변위감도  $S$ 로 나누어주면 실제 진동진폭을 얻을 수 있다.

미소 진동진폭을 측정하기 위해 사용되는 다중반사계는 이 외에도 여러 종류가 있으나 본 연구에서는 Fig. 6에 보이는 것과 같이 비교적 구성과 광선정렬이 쉬운 다중반사계를 사용하였다.

Fig. 6에서 볼록렌즈에 입사하는 광선의 입사각을  $h$ 라 하고 직각프리즘의 축과 렌즈의 축이  $\Delta x$ 만큼 떨어져 있다고 할 때 입사광이  $n$ 회 반사한 후 입사경로를 따라 되돌아 나오기 위해서는 다음의 관계가 만족되어야 한다.

$$\Delta x = \frac{h}{n-1} \tag{16}$$

여기서 반사회수  $n$ 은 프리즘 모서리에서 불완전한 반사를 피하기 위해 홀수만 취한다.

반사경의 변위  $d(t)$ 가 식(4)로 표현되는 정현진동이라 하고 렌즈의 초점심도(focal depth)내에서 진동이 일어난다고 간주될 수 있을 정도로 진동진폭이 작은 경우 탐사광의 광경로 변화량은 다음과 같이 주어진다.

$$\delta(t) = 2d_0 \cos(\Omega t) \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} \cos \alpha_i \right\}, \tag{17}$$

$n = \text{odd integer}$

여기서  $\alpha_i$ 는 반사면에  $i$ 번째 입사하는 광선의 입사각으로 렌즈의 초점거리를  $F$ 라고 하면 다음 식으로 표현된다.

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left( \frac{n-2i+1}{n-1} \cdot \frac{h}{F} \right) \tag{18}$$

따라서 이 시스템의 변위감도  $S$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$S = 1 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \cos \alpha_i \quad (19)$$

이 시스템은 Fig. 5에서 보는 것과는 달리 탐사광이 진동체의 한 점에서 반사가 일어나기 때문에 국소부위의 진동측정이 가능할 뿐만 아니라 입사광과 반사광이 일치되어 Fig. 1에 예시한 간섭계의 탐사광로에 직접 사용할 수 있다는 장점이 있다.

5. 컴퓨터 계산에 의한 모의실험

본 연구에서는 간섭무늬 보간법과 곡선 맞춤법의 정밀도를 비교하기 위해 컴퓨터에 의한 모의실험을 하였다. 이를 위해 우선 식(9)를 이용하여 컴퓨터로 일정한 진동진폭에 대한 정확한 간섭무늬를 발생시킨 후 실험에서 발생될 수 있는 오차를 고려하기 위해 정규분포를 갖는 우연오차(random error)를 각 점에서의 계산값에 더해준다. 간섭무늬 형태를 나타내는 수치는  $\pm 1$  사이의 값을 갖도록 규격화하였으며 일반적인 디지털 신호분석기의 지시값이 3자리의 유효수자를 갖기 때문에 소수점 아래 넷째 자리에서 사사오입하였다.

이와같은 방법으로 진동의 한주기에 해당되는 간섭무늬를 발생시킨 후 곡선 맞춤법을 이용하기 위해 진동의 한주기를 각각 200, 100, 50, 20등분하여 각점에 해당되는 간섭무늬의 값(우연오차 포함)을 결정한다.

간섭무늬 보간법을 이용하기 위해서는 위에서 얻은 간섭무늬의 값중 양 끝단의 값을 평균한 값 및 중심점의 값과 간섭무늬의 수를 이용하여 식(12)에 의해 진동진폭을 계산한다.

한편 곡선 맞춤법은 위에서 계산한 각점의 값을 curve fitting program에 입력시켜 진동의 한 주기당 측정점의 수  $M$ 과 우연오차의 표준편차에 따른 진동진폭값을 결정한다.

6. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 비교적 광선정렬(optical alignment)이 손쉬운 다중반사계를 도입하였다. 다중반사계를 도입한 레이저 간섭계와 측정장치는 Fig. 7에서 보는 것과 같다. 다중반사계는 초점거리  $F$ 가 190mm이고 직경이 54mm인 볼록렌즈와 직각프리즘(30×30×20mm)을 사용하여 구성하였다. 이 계에서 볼록렌즈에 처음 입사하는 입사광선의 입사고

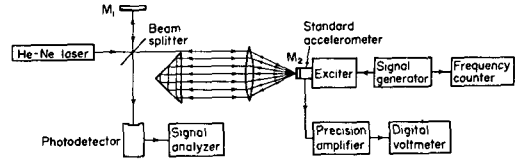


Fig. 7 Schematic diagram of the experimental set-up.

$h$ 는 19.5mm이다.

Fig. 8은 본 연구에 사용된 다중반사계에서  $n=7$ 인 경우의 광로를 보여주는 사진이다. 이 사진에서 좌측 상단으로부터 입사된 광파는 렌즈에 의해 우측의 가속도계에 부착된 반사경에 초점을 형성시킨 후 반사되어 다시 다중반사계로 들어가는 것을 볼 수 있으며 모든 광선이 반사경의 한 점에 초점을 형성하는 것을 볼 수 있다.

광원으로는 파장이 632.8nm인 He-Ne레이저(Spectra Physics 124B, 15mW)를 사용하였으며 광검출기에서 나온 전기적 신호는 2-Channel FFT Analyzer(Wavetek 660B; 시간신호 기록 가능)를 사용하여 측정하였다.

다중반사계를 이용한 간섭계로 측정된 결과를 비교하기 위해 반사경  $M_2$ 를 미 연방표준국에(National Bureau of Standards)에서 교정받은 표준가속도계(B&K 8305S, S/N 894995)에 부착시켰다. 표준가속도계는 Fig. 7에 보이는 것처럼 가속도계의 교정에 이용되는 가진기(exciter)에 결합시켰으며 가진기로 정현진동을 가하면서 간섭계와 가속도계를 사용해 각각 진동변위와 진동가속도를 측정하였다. 정현신호는 정밀한 신호발생기(HP 8642 A)를 이용하여  $f=1000.00\text{Hz}$ 의 주파를 발생시켰으며 이를 확인하기 위해 주파수 측정기(HP 5316A)를 사용하였다.

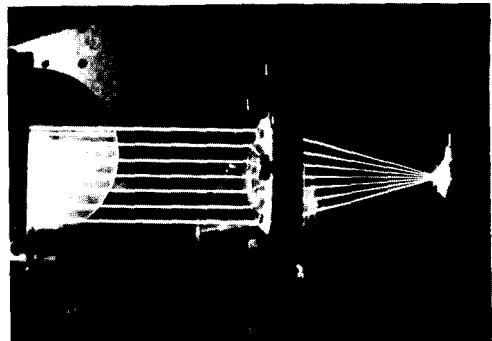


Fig. 8 Photograph of multiple reflected beams.

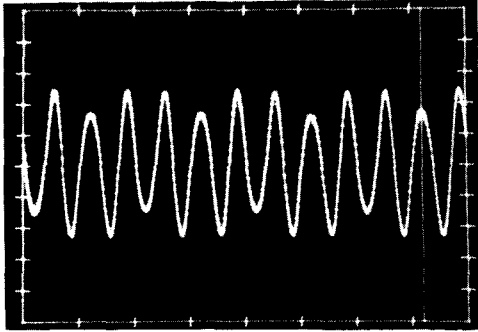


Fig. 9 Photograph of interference fringe on digital signal analyzer.

정현진동을 하는 경우 진동변위는 진동가속도를  $(2\pi f)^2$ 으로 나누어주면 되므로 진동 주파수만 알면 진동진폭을 쉽게 계산할 수 있다.

본 연구에서는 위에서와 같이 1000.00Hz의 정현진동을 가하면서 반사회수  $n=7,11,15$ 일 경우 각각의 진동진폭에 대해 디지털 신호분석기에 나타난

간섭무늬 형태를 진동의 한 주기당 101개의 동일한 시간간격으로 측정하였으며 이를 곡선 맞춤법에 이용할 때는  $M=101,51,21$ 이 되도록 등간격의 측정값을 사용하였다. Fig. 9는 실제 측정된 간섭무늬의 형태가 디지털 신호분석기에 나타난 것을 사진으로 찍은 것이다.

### 7. 실험결과 및 논의

컴퓨터를 이용한 모의실험에서는 He-Ne레이저 파장( $\lambda=632.8\text{nm}$ )의 약 1/4인 150nm의 진폭을 갖는 진동에 대하여 모의실험하였다.

우연오차의 표준편차  $\sigma_R$ 과 진동의 한 주기당 측정점의 수  $M$ 을 변화시키면서 계산한 진동진폭값이 Table 1에 주어져 있다. 여기에서 각각의 진동진폭값은 100개의 임의의 간섭무늬 형태로부터 계산한 진동진폭값을 평균한 값이며  $\sigma_D$ 는 100개의 진동진폭값에 대한 표준편차이다.

Table 1 Results of computer simulation for vibration displacement measurement

Exact displacement(nm)		150.5			
$\sigma_R$	No. of data points, $M$ per period	Curve fitting		Interpolation	
		Disp.(nm)	$\sigma_D$ (nm)	Disp.(nm)	$\sigma_D$ (nm)
0.01	201	150.0	0.1	150.2	1.3
	101	150.0	0.1		
	51	150.0	0.2		
	21	150.0	0.2		
0.02	201	150.0	0.2	150.2	1.4
	101	150.0	0.2		
	51	150.0	0.3		
	21	150.0	0.5		
0.03	201	150.0	0.2	149.9	2.3
	101	150.0	0.3		
	51	150.0	0.5		
	21	150.0	0.7		
0.04	201	150.0	0.3	150.6	2.8
	101	150.0	0.4		
	51	150.0	0.6		
	21	149.9	0.9		
0.05	201	150.0	0.4	150.6	3.1
	101	149.9	0.5		
	51	149.9	0.7		
	21	150.0	1.2		

Table 1에서 알 수 있듯이 곡선 맞춤법의 결과는 진동진폭의 평균값 자체에는 큰 변화가 없으나 우연오차의 표준편차  $\sigma_R$ 이 작을 수록 또한 진동의 한 주기당 측정점의 수  $M$ 이 클수록 진동진폭의 표준편차  $\sigma_D$ 가 곡선 맞춤법의 결과와는 비교가 안 될 정도로 큰 것을 알 수 있다. 따라서 미소한 진동진폭을 측정하기 위해서는 간섭무늬 보간법이 적당치 않으며 정밀측정을 위해서는 곡선 맞춤법을 사용하는 것이 바람직하다.

Fig. 10은 실제 측정된 101개의 간섭신호와 이를 이용하여 곡선 맞춤법에 의해 구한 미정계수를 식

(9)에 대입하여 재구성한 간섭신호를 보여준다. Fig. 10(a)는 간섭신호 측정값의 표준편차  $\sigma_R$ 이 0.01인 경우이고 (b)는  $\sigma_R$ 이 0.03인 경우이다. 여기서 간섭신호 측정값의 표준편차는 컴퓨터 모의실험에서 사용한 정규분포를 갖는 우연오차의 표준편차와 동일한 의미를 갖고 있기 때문에 동일한 기호를 사용하였다.

Table 2에는 실제 실험을 통하여 측정된 진동진폭의 값이 주어져 있다. 여기에는 동일한 반사회수에 대해 세개의 서로 다른 진동진폭을 간섭계로 측정된 결과와 이를 비교하기 위해 가속도계로 측정

Table 2 Experimental results of vibration displacement measurement

$n$	Curve fitting			Interpolation	Accelerometer		
	$M$	Vibration disp.(nm)	$\sigma_R$	Vibration disp.(nm)	Acceleration ( $\times 10^{-2}g$ )	Vibration disp.(nm)	
7	101	19.86	0.01	19.81	8.02	19.91 $\pm$ 0.10	
	51	19.86	0.01				
	21	19.85	0.01				
	101	20.94	0.01	20.87	8.43	20.92 $\pm$ 0.10	
		51	20.93				0.02
		21	20.92				0.03
	101	19.82	0.03	19.93	8.00	19.86 $\pm$ 0.10	
		51	19.82				0.03
		21	19.87				0.03
11	101	13.93	0.02	13.94	5.60	13.90 $\pm$ 0.07	
	51	13.92	0.02				
	21	13.93	0.02				
	101	13.94	0.02	13.96	5.63	13.97 $\pm$ 0.07	
		51	13.94				0.02
		21	13.99				0.02
	101	13.84	0.03	13.93	5.56	13.80 $\pm$ 0.07	
		51	13.83				0.03
		21	13.85				0.03
15	101	10.56	0.03	10.64	4.20	10.57 $\pm$ 0.05	
	51	10.58	0.04				
	21	10.54	0.04				
	101	9.32	0.03	9.39	3.77	9.36 $\pm$ .05	
		51	9.33				0.02
		21	9.37				0.03
	101	9.01	0.02	9.05	3.64	9.03 $\pm$ 0.05	
		51	9.02				0.03
		21	9.01				0.02

(Gravitational acceleration at Korea Standards Research Institute ;  $g=9.7982994m/sec^2$ )



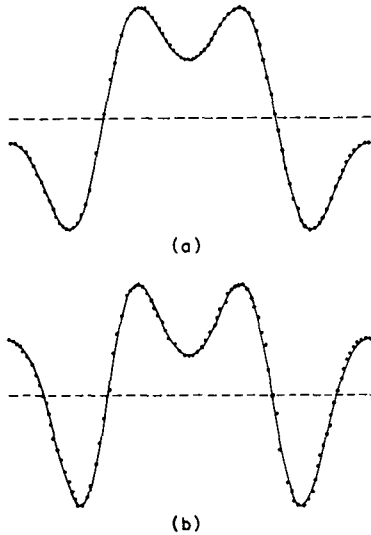


Fig. 10 Measured and calculated interference fringe patterns, (a)  $\sigma_R=0.01$  and (b)  $V_R=0.03$ .

한 값도 주어져 있으며 간섭신호 측정값의 표준편차도 주어져 있다.

본 연구에 사용된 가속도계는  $\pm 0.02\%$ 의 오차를 갖고 있으며 진동계는  $\pm 0.5\%$ 의 오차를 갖고 있다. 따라서 이 표에서 보듯이 곡선 맞춤법에 의해 측정된 결과는 측정점의 수  $M$ 에 관계없이 모두 진동계의 오차범위내에서 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 간섭무늬 보간법에 의해 측정된 결과는 대부분 오차범위 내에 들고 있으나 몇몇 측정값은 약간 벗어나는 것을 알 수 있다.

한편 Table 1에서 보듯이 측정된 간섭신호의 표준편차  $\sigma_R$ 가 0.03인 경우 진동진폭값의 표준편차는 진동의 한주기당 측정점의 수  $M$ 이 101인 경우 0.3 nm이므로 이를 백분율로 표시하면 약 0.2%가 되는 것을 알 수 있다. Table 2에서 보듯이 측정점의 수  $M$ 이 101인 경우 모든 측정값의 표준편차  $\sigma_0$ 가 0.03보다 작기 때문에 이의 측정오차는  $\pm 0.2\%$  이내에서 드는 것으로 볼 수 있으나 변위감도  $S$ 를 결정하는 과정에서 발생하는 오차를 감안한다면 이보다 약간 커질 것으로 생각된다.

이와같은 방법은 궁극적으로 가속도계의 교정에 이용될 수 있을 것이다. 레이저 간섭계에 의한 가속도계의 교정시 교정오차는  $\pm 0.05\% \sim \pm 0.1\%$ 가 되므로 이 정도의 교정정밀도를 얻기 위해서는 간섭신호의 표준편차와 변위감도  $S$ 의 오차를 줄여주어야 한다. 간섭신호의 표준편차  $\sigma_0$ 를 줄여주기

위해서는 간섭장치를 정밀하게 정렬하고 좀더 높은 분해능을 갖는 분석장치를 이용하여 측정점의 수  $M$ 을 증가시키면 될 것이다. 또한 렌즈의 초점거리와 입사광선의 입사각  $h$ 를 정밀하게 측정하면 변위감도  $S$ 의 오차를 줄여줄 수 있으므로 가속도계의 교정에 충분히 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 8. 결 론

미소 진동진폭의 정밀한 측정을 위해 다중반사계를 도입한 고감도 레이저 간섭계를 이용하였다. 다중반사계는 비교적 광선정렬이 용이한 한개의 볼록 렌즈와 직각프리즘을 사용하는 방법을 이용하였다. 이와같은 다중반사계로 반사회수를 15회 까지 증가시켜 간섭신호를 측정하여 곡선 맞춤법을 이용한 결과 9.01nm의 진동진폭을 정밀하게 측정할 수 있었다.

간섭계를 이용하여 측정된 결과의 신뢰도를 확인하기 위해 컴퓨터에 의한 모의실험을 하였다. 이 결과에 의하면 간섭계를 이용하여 측정된 간섭신호를 곡선 맞춤법을 사용하여 계산한 진동진폭값은 충분한 정밀도를 갖는 것을 알 수 있었다. 더우기 진동의 한 주기당 간섭신호 측정값의 수를 증가시킬 경우 정밀도가 향상되는 것을 알 수 있으며, 간섭무늬 보간법에 의한 결과는 정밀도가 높지 않으므로 미소 진동의 정밀측정에는 적합한 방법이 아님을 알 수 있다.

이와같은 다중반사계를 이용한 간섭장치는 궁극적으로 진동 가속도계의 절대교정에 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 가속도계의 절대교정에 사용하기 위해서는 측정값의 표준편차와 다중반사계의 변위감도 오차를 좀 더 줄여주어야 할 필요가 있다.

또한 비교적 진동진폭이 큰 저주파 영역에서 사용되는 간섭무늬 수 측정방법에 다중반사계를 도입할 경우 동일 진폭에 대해 간섭무늬의 수를 변위감도만큼 증가시킬 수 있으므로 교정정밀도를 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 교정 주파수 영역을 확장시킬 수 있다. 특히 다중반사계를 이용한 레이저 간섭계와 곡선 맞춤법을 이용하면 진동진폭이 작아지는 고주파 영역에서의 가속도계 교정에 효과적으로 이용될 수 있을 것이며, 중간 주파수 영역에서 다중반사 레이저 간섭계와 간섭무늬 보간법을 적절히 이용하게 되면 전 주파수 영역에서 간단한 간섭

장치로 가속도계의 교정이 가능할 것이다.

### 참 고 문 헌

- (1) Schmidt, V.A., Edelman, S., Smith, E.R., and Jones, E., 1961, "Optical Calibration of Vibration Pickups at Small Amplitudes", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 33, No. 6, pp. 748~751.
- (2) Kwaaitaal, Th., 1974, "Contribution to the Interferometric Measurement of Sub-Angstrom Vibrations", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 45, No. 1, pp. 39~41.
- (3) Keller, R., Salathe, R., Tschudi, T., and Voumard, C., 1975, "Michelson Interferometer for Detection of Fast Displacement of Less Than a Quarter-Wave over Small Areas", *Appl. Opt.*, Vol. 14, No. 7, pp. 1616~1620.
- (4) Payne, B.F., Koyanagi, R.W., Federman, C., and Jones, E., 1975, "Accelerometer Calibration at the National Bureau of Standards", Paper No. ISAASI 75255, 21st International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, Philadelphia, Pennsylvania/May 19~21.
- (6) 윤재선, 이상수, 1983, "다중레이저 Doppler효과를 이용한 미소 변위의 측정", *새물리*, 제23권, 제1권, pp. 8~12.
- (7) 이두희, 서상준, 은희준, 1987, "다중반사 레이저 간섭계를 이용한 미소 진동진폭의 측정", *새물리*, 제27권, 제3권, pp. 239~244.
- (8) "Vibration Pickup Calibration", Rion Co. Ltd., Tokyo, Japan, pp. 15~19
- (9) 은희준, 서상준, 이두희, 조문재, 1986, "레이저 간섭계에 의한 정밀 진동측정장치 개발", 한국표준연구소 연구보고서, KSRI-86-10-IR, pp. 81~89.