

레이저 다이오드를 이용한  
정현파 위상변조 간섭에 의한  
실시간 극미세 진동 측정에 관한 연구

A study on real time measuring microscopic movements  
in sinusoidal phase modulating interferometry using a laser diode

강 성철 \*      진 상규      지 철근  
Kang Sungchul      Jin Sangkyu      Chee ChuKeun

서울대학교 공과대학 전기공학과

Dep. of electrical Eng. Seoul National University

ABSTRACT

A new signal processing system for real time displacement measurement in sinusoidal phase modulating interferometry is described.

Although sinusoidal phase modulating interferometry is effective in measuring with high accuracy the displacement of an object, conventional signal processing takes along time. In this method, detection of the object's displacement is easily achieved by sampling the interference signal at those times that satisfy certain conditions and by processing the sampled signals with electric circuits in real time. the delay time of this signal processing system is  $< 45 \mu s$ . Specially in this paper we describe all electronic circuit and optical system design.

I. 서론

정밀제조 기술이 발전함에 따라 높은 정밀도로 기계의 미세한 움직임을 측정하고 제어하는 것이 더욱 중요하게 되었다. 따라서, 이러한 미세진동을 측정하는데 있어서 광학적인 간섭 기술들이 사용된다. 이 중에서도 heterodyne 간섭법이 널리 사용되지만 이 방법은 bragg cell 과 같은 주파수 변이를 필요로 하는 소자가 사용되어야만 한다. 그러나, 본 논문은 정현적으로 진동하는

거울을 대상으로 쉽게 정현 위상 변조광 ( Sinusoidal phase modulating light )을 얻어, 이것을 이용하는 간섭법을 제시한다. 이 방법으로 물체의 변위를 매우 높은 정밀도로 측정할 수 있다. 그러나, 이 간섭신호를 컴퓨터에 의해 푸리에 변환( Fourier Transform )을 해야만 결과를 얻을 수 있기 때문에 긴 시간이 소요된다. 그래서, 본 논문은 컴퓨터를 사용하지 않고 실시간( Real time )으로 변위를 측정할 수 있는 방법을 제시한다. 즉, A/D 컨버터, 마이크로프로세서 그리고, Analog 회로와 D/A 컨버터 등으로 구성되는 위상 감지기( Phase detector )를 이용하여 전형적인 방법들보다 훨씬 더 짧은 지연시간( Delay time )을 갖게 되고, 이 시간은 약  $45 \mu s$  이하이므로 실시간 측정이 가능하다.

II. 이론

A. 광학계로부터의 신호 감지

실시간 변위 측정 시스템의 구성도를 그림 1 에 나타내었다. Trynman- Green 간섭계가 구성되고 레이저 다이오드(LD)가 광원으로 사용된다. 레이저 다이오드로 주입되는 전류는 직류 바이어스 전류  $I_0$ 와 레이저 다이오드 변조기(LM)에 의한 변조 전류  $I_m$ 으로 이루어진다. 변조전류는  $\beta I_m(t)$ 의 크기로 레이저 다이오드의 파장을 변화시킨다. 중심파장  $\lambda_0$ 는 직류 바이어스 전류  $I_0$ 에 의하여

$\pi$  사이의 범위에서 정의되는 arccosine 변환표로부터 얻어진다. 비록 감지되는 위상  $\alpha(t)$  는 offset  $\pi$  를 포함하지만 상대적인 변위가 요구되므로 offset은 무시될 수 있다.

sign of $\sin \alpha(t)$	phase $\alpha(t)$
+	$p$
-	$-p + \pi$

표 1.  $\cos \alpha$ 로부터 얻어진 위상

다음에  $2\pi$  이상되는 범위에서 연속적인 위상  $\alpha(t)$ 를 얻기 위해  $\sin \alpha(t)$ 의 부호가 변할 때 위상  $\alpha(t)$ 에 수정이 필요하다. 그 수정은 다음과 같다.  $\cos \alpha(t)$ 가 양의 부호로 머무르고 있을 때  $\sin \alpha(t)$ 의 부호는 음으로부터 양으로 변하고 위상  $\alpha(t)$ 에  $\pi$ 가 더해진다. 역으로  $\sin \alpha(t)$ 의 부호가 양에서 음으로 변하면 위상  $\alpha(t)$ 에  $-\pi$ 가 더해진다.  $\cos \alpha(t_m)$ 가 음의 부호로 머무르고 있을 때 표 2에서 보는 것처럼 유사한 연산들이 행해진다.

$\cos \alpha(t)$	$\sin \alpha(t)$	수정
+	- $\rightarrow$ +	$+\pi$
	+ $\rightarrow$ -	$-\pi$
-	- $\rightarrow$ +	$-\pi$
	+ $\rightarrow$ -	$+\pi$

표 2. 연속된 위상  $\alpha$ 를 얻기 위한 수정

### III. 신호처리 시스템

그림 1에서 보듯이  $S_2(t)$ 는 미분기를 사용하여  $S(t)$ 를 미분함으로써 얻어진다.  $S(t)$ 의 진폭  $S_0$ 는 peak hold circuit을 사용하여 얻어진다.  $S_2(t)$ 와  $S(t)$ 를 샘플링하는 펄스는 zero cross circuit을 사용하여 변조 전류로부터 얻는다. 위상 감지기의 블럭도가 그림 3에 있다.  $S(t)$ 는 8비트 A/D 컨버터의 아날로그 입력으로 들어가고,  $S(t)$ 의 진폭  $S_0$ 는 reference 입력으로 들어간다.  $S(t)$ 가 샘플링될 때  $S(t_m)/S_0$ 로 변환된다. 또한  $S(t)$ 와  $S_2(t)$ 는 latch 회로로 연결되고 그들의

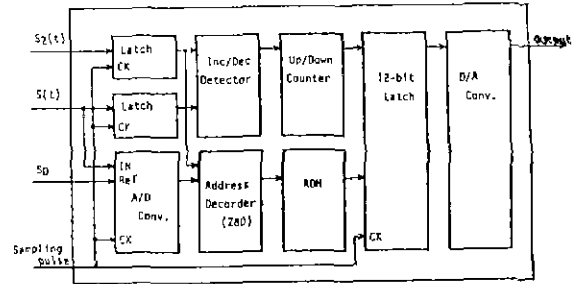


Fig 3 Block diagram of a phase detector

그림 3. 위상감지기의 블럭도

부호도 샘플링된다. A/D 컨버터의 출력 데이터 A와  $S_2(t_m)$ 의 부호 데이터는 마이크로프로세서 Z-80으로 이루어지는 변지 디코더 (address decoder)로 연결된다. 만일  $S(t_m)$ 의 부호가 양이면 변지 디코더의 출력 데이터는 A이고, 음이면  $-A + 255$ 이다. arccosine의 표는 ROM에 쓰여진다. 0번지의 데이터는 0(rad)이고, 255번지의 데이터는  $\pi$ (rad)이다. ROM은 변지 디코더에 의해 생성되는 변지로 마이크로프로세서에 의해 액세스(access)된다. 표 1에 따라 위상  $\alpha(t_m)$ 의 하위 비트로 8비트 데이터  $a_1$ 을 얻는다.  $\cos \alpha(t_m)$ 과  $\sin \alpha(t_m)$ 의 부호는 표 2에서 보는 것처럼  $\pi$ 만큼 증감시키기 위해 증감감지기 (increment decrement detector)로 입력된다.  $\pi$ 만큼 변화하는 횟수는 4비트 업/다운 카운터 (4 bit Up/Down counter)에 의하여 계산된다. 그 때, 상위 비트로서 4비트 데이터  $a_2$ 를 얻는다. 따라서, 12비트 디지털 데이터를 얻게 되어  $0 \leq a_1 \leq \pi$ ,  $-8 \leq a_2 \leq 7$ 인 곳에서

$$\alpha(t_m) = a_1 + a_2 \pi \quad (11)$$

로 표현되는  $\alpha(t_m)$ 을 얻는다. 또한, 12비트 D/A 컨버터를 사용하여 아날로그 데이터로서  $\alpha(t_m)$ 을 얻는다. 신호 처리에 따르는 지연시간은 대부분이 A/D 컨버터의 변환시간과 마이크로프로세서 프로그램의 수행시간에 의존한다. 이 신호처리 시스템의 전 지연시간은 약  $45 \mu s$ 이다.

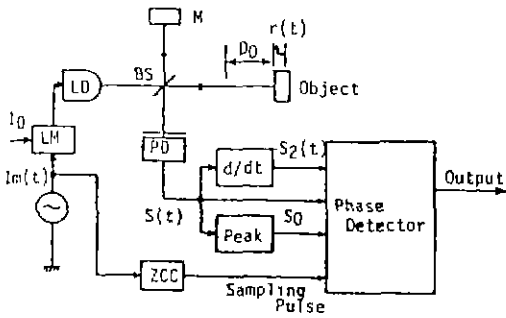


그림 1. 정현 위상 변조 간섭 신호의 동기화 샘플링 처리 실시간 변위 측정 시스템

결정된다. 변조전류  $I_m(t)$ 는

$$I_m(t) = A \cos \omega_c t \quad (1)$$

로 표현되며 거울 M에 의해 반사되는 광선이 기준 파가 된다. 측정물의 변위는  $r(t)$ 이며 간섭계의 두 팔(arm) 사이의 광로차는  $2[ D_0 + r(t) ]$  이다. 이때 photo diode (PD)에 의해 감지되는 간섭 신호의 교류 성분은

$$S(t) = S_0 \cos [ z \cos \omega_c t + \alpha(t) ] \quad (2)$$

$z = 4\pi a \beta D_0 / \lambda_0^2$  이고, 위상  $\alpha(t)$ 는

$$\alpha(t) = (4\pi / \lambda_0) [ D_0 + r(t) ] \quad (3)$$

로 주어진다. 만일 위상  $\alpha(t)$ 가 신호  $S(t)$ 로부터 실시간으로 얻어진다면 측정물의 변위는 실시간으로 측정된다.

위상  $\alpha(t)$ 를 얻기 위한 신호처리의 원리는 다음과 같다. 신호  $S(t)$ 를 진폭  $S_0$ 로 나누면

$$S_1(t) = \cos [ z \cos \omega_c t + \alpha(t) ] \quad (4)$$

가 된다. 이 때  $\cos \omega_c t_m = 0$  인 조건을 만족하는 시간들  $t_m$ 에서 즉,  $t_m = 2m\pi + \pi/2$  또는  $2m\pi + 3\pi/2$  그리고,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  일 때  $S_1(t)$ 를 샘플링하면

$$S_1(t_m) = \cos [ \alpha(t_m) ] \quad (5)$$

가 얻어진다. 또 식(2)를 미분하면,

$$S_2(t) = S_0 \{ -z\omega_c \sin \omega_c t + [ d\alpha(t)/dt ] \} \quad (6)$$

가 얻어진다.  $S_1(t)$ 가 샘플링될 때 같은 시간  $t_m$ 에서  $S_2(t)$ 를 샘플링하면

$$\epsilon = z\omega_c - [ d\alpha(t)/dt ] \quad (7)$$

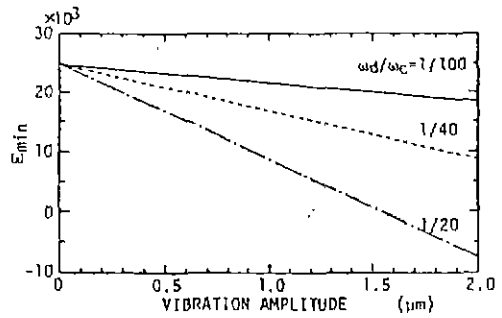


그림 2. 다양한  $\omega_d/\omega_c$ 의 비에 대한 진동 진폭 b의 함수로서  $\epsilon_{min}$ 의 값들

일 때

$$S_2(t_m) = \pm \epsilon S_0 \sin \alpha(t_m) \quad (8)$$

을 얻는다. 양과 음의 부호는  $t_m = 2m\pi + \pi/2$  또는  $2m\pi + 3\pi/2$  일 때 각각 취해진다. 측정물의 변위가 정현적인 진동이라고 가정하면

$$r(t) = b \cos \omega_d t \quad (9)$$

이고 따라서 식 (7)의 최소값은

$$\epsilon_{min} = z\omega_c - 4\pi b\omega_d/\lambda_0 \quad (10)$$

이다. 그림 2는 다양한  $\omega_d/\omega_c$ 의 비에 대한 진동 진폭 b의 함수로서  $\epsilon_{min}$ 의 값들을 나타낸다. 변조 주파수가 측정물의 진동 주파수보다도 훨씬 클 때  $\epsilon_{min}$ 은 음의 값을 취하지 않는 것은 명확하다. 이렇게 해서 식(8)로부터  $\sin \alpha(t_m)$ 의 부호와  $\cos \alpha(t_m)$ 의 값으로부터 위상  $\alpha(t_m)$ 을 결정할 수 있다. 그러나, 위상  $\alpha(t_m)$ 은  $-\pi$  와  $\pi$  사이의 범위에서 정의된다. 따라서, 그 범위를 넘어갈 때의 위상  $\alpha(t_m)$ 에 대한 수정이 필요하다.  $2\pi$  이상의 영역에서의 위상결정은 II.B 에서 기술한다.

### B. 위상 $\alpha(t)$ 의 결정

먼저 표 1 에서 보는 것처럼  $\sin \alpha(t)$ 의 부호에 따르는  $\cos \alpha(t)$ 에 대한 두 개의 다른 위상을 준다.  $\sin \alpha(t)$ 의 부호가 양일 때  $\alpha(t_m)$ 의 값은 P 이고, 음일 때는 비록  $\alpha(t)$ 의 값은 -P 이지만  $-P + \pi$  로 설정한다. 이  $\alpha(t)$ 의 값은 0과

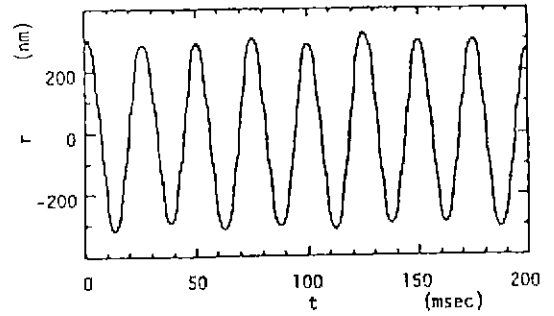
#### IV. 실험

실험 설치도는 그림 1에 보였다. 광원은 최대 출력 5 mW, 파장 780 nm 인 적외선 레이저 다이오드이다. 측정물은 미러 코팅 (mirror coating) 된 압전소자 (piezoelectric transducer) 이다. 정현위상변조의 진폭  $z$  는 1.2 이고 광로차  $2D_0$  는 2 cm 이다. 먼저 50 Hz 정현 진동이 측정물에 인가 되었다. 정현 위상 변조 주파수는 1 kHz 였다. 컴퓨터에 의해 전형적으로 처리된 변위 측정값을 그림 4 (a) 에 보였다. 한편, 그림 4 (b) 는 본 논문에서 기술된 방법에 의해 측정된 변위값이다. 두 측정이 잘 일치하고 있으며, 이것은 여기서 제시된 방법이 전형적인 것과 같은 정확도로 실시간 변위측정을 할 수 있음을 보여준다.

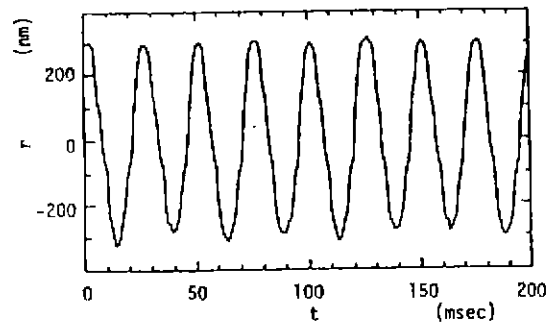
다음에 이 방법의 측정 가능한 범위를 조사했다. 100 Hz 정현 진동이 측정물에 인가되고 정현 위상 변조 주파수는 20 kHz 였다. 그림 5 (a) 는 작은 진폭의 진동에 대한 측정 결과이다. 위상 감지의 정확도는 A/D 컨버터의 비트수에 의존한다. 이 실험으로 측정 가능한 최대 변위가 그림 5 (b) 에 보여진다. 측정 진폭은 전 비트 수를 증가시킴으로써 더 커지게 된다. 마지막으로 100 Hz 인 삼각파와 40 Hz 인 구형파를 인가했을 때의 측정 결과를 그림 6 (a) 와 (b) 에 각각 나타내었다. 정현 위상 변조 주파수는 그림 5 와 같다. 삼각파와 구형파에서 나타나는 급속한 변화의 움직임이 측정되었다.

#### V. 결론

정현 위상 변조 간섭계로 실시간 변위 측정을 제시했다. 간섭신호는 정현 위상 변조 신호와 동기화 되어 샘플링 된다. 이 방법에서 캐리어 성분은 특정한 시간에서 신호를 샘플링 함으로써 제거 된다. 간단한 신호 처리 회로를 사용하여 측정물의 실시간 변위 측정을 하는 것이 가능하였다. 지연 시간은  $45 \mu s$  이하이고 이 것은 측정물의 움직임을 제어하기에 충분히 짧다.



(a)

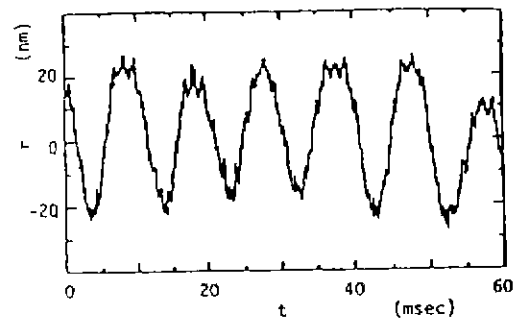


(b)

그림 4 측정된 정현 진동들

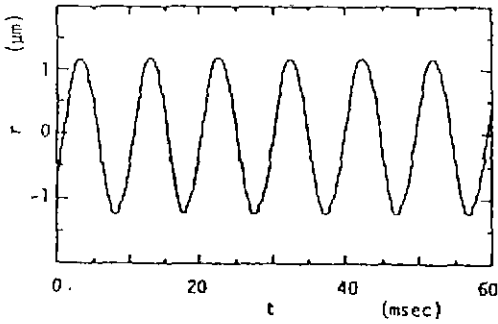
(a) 컴퓨터 처리

(b) 여기서 제시된 실시간 신호처리



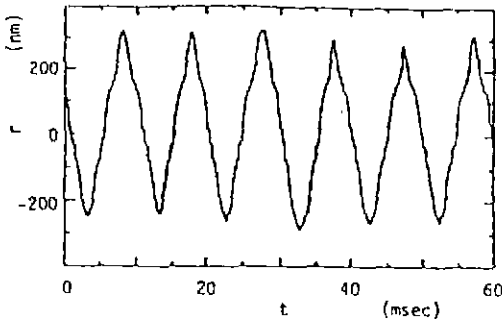
(a)

참고문헌

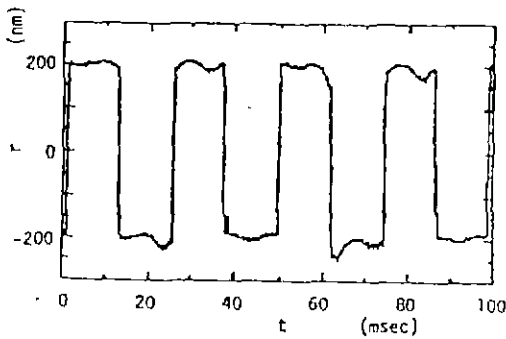


(b)

그림 5.  $f = 100$  Hz 인 측정된 정현 진동들.  
진동 진폭 (a) 20 nm (b) 1.2  $\mu$ m



(a)



(b)

그림 6. 측정된 (a)  $f = 100$  Hz 삼각파 진동  
(b)  $f = 40$  Hz 구형파 진동

1. G.E. Sommargren, "Optical Heterodyne Profilometry," *Appl. Opt.* 20, 610-618 (1981)
2. S.Ueha, K. Shiota, T.Okada, and J.Tsujuchi "Optical Heterodyne Measurement of In-Plane Vibrations," *Opt. Commun.* 10, 88-90 (1974)
3. W.Puschert, "Optical Detection of Amplitude and Phase of Mechanical Displacements in the Angstrom Range," *Opt. commun.* 10, 357-361 (1974)
4. N.A.Massie, R.D. Nelson, and S.Holly, "High-Performance Real-time Heterodyne Interferometry," *Appl. Opt.* 18, 1797-1803, (1979)
5. N.A Massie, "Real-time Digital Heterodyne Interferometry: A System," *Appl. Opt.* 19, 154-160 (1980)
6. O.Sasaki and T.Yagiuchi, "Sinusoidal Phase Modulating Interferometry," *Jpn.J. Opt.* 15-25-30 (1986)
7. O.Sasaki and H.Okazaki, "Analysis of Measurement Accuracy in Sinusoidal Phase Modulating Interferometry," *Appl. Opt.* 25, 3152-3158 (1986)
8. O.Sasaki and K.Takahashi, "Sinusoidal Phase Modulating Interferometer using Optical Fiber for Displacement Measurement," *Appl. Opt.* 27, 4139-4142 (1988)
9. O.Sasaki and K.Takahashi, "Real-Time Interferometric Displacement Measurement by Fiber-Optic Sinusoidal Phase-Modulation," *Jpn.J. Opt.* 17, 472-476 (1988)