

수자식마이켈손간섭계를 리용한 미소진동변위측정

로주혁, 김철수

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《오늘 우리앞에 나선 중요한 문제의 하나는 과학과 기술을 발전시키는것입니다.》

(《김일성전집》 제27권 270페이지)

진동방식해석과 진동변위측정은 각종 기계부분품들과 전자요소들의 품질평가에서 큰 의의를 가진다. 2차원진동해석에서 가장 많이 쓰이는 광학적인 방법은 홀로그래피간섭법과 스펙클간섭법이다.[1-3] 그러나 진동변위가 매우 작은 특정한 점의 진동변위를 정량적으로 평가하는데서 효과적인것은 전통적인 마이켈손간섭계를 리용한 간섭무늬의 대조도평가법이다.

우리는 수자식마이켈손간섭계를 리용하여 간섭무늬대조도를 평가하는 방식으로 미소진동변위를 측정하는 한가지 방법을 제기하였다.

1. 간섭법에 의한 미소진동의 변위측정원리

일반적으로 간섭무늬의 빛세기분포 I 는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$I = I_0(1 + \gamma \cos \Delta\phi) \quad (1)$$

여기서 I_0 은 간섭무늬의 배경빛세기, γ 는 무늬대조도, $\Delta\phi$ 는 두 빛파동들사이의 위상차이다. 만일 간섭하는 두 빛중에서 하나가 진동체로부터 반사된 빛이라면 간섭무늬에는 진동변위에 관계되는 광학적행로차가 추가적으로 반영된다.

$$I = I_0 \left\{ 1 + \gamma \cdot \cos \left[\Delta\phi + \frac{2\pi}{\lambda} 2z \sin(\omega t) \right] \right\} \quad (2)$$

여기서 z 는 측정점의 최대진동폭이며 ω 는 진동주파수이다.

이 경우 측정점으로부터 반사되어오는 빛파동의 위상은 시간에 따라 $4\pi z \sin(\omega t)/\lambda$ 로 변한다. 측정물체가 진동할 때 가림판면에서 간섭무늬의 세기분포 I 는 기록시간(T)동안에 생긴 수많은 간섭무늬들의 시간평균으로 표시할수 있다.

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T I_0 \left\{ 1 + \gamma \cos \left[\Delta\phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} 2z \sin(\omega t) \right] \right\} dt \quad (3)$$

이제 기록시간 T 가 진동주기($T' = 2\pi/\omega$)에 비하여 대단히 크다고 가정하면 식 (3)은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} I &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T I_0 \left\{ 1 + \gamma \cos \left[\Delta\phi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} 2z \sin(\omega t) \right] \right\} dt = \\ &= I_0 \left[1 + \gamma \cdot J_0 \left(\frac{4\pi}{\lambda} z \right) \cdot \cos \Delta\phi_0 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $J_0(x)$ 는 1종의 령차베셀함수이다. ($x = 4\pi z / \lambda$)

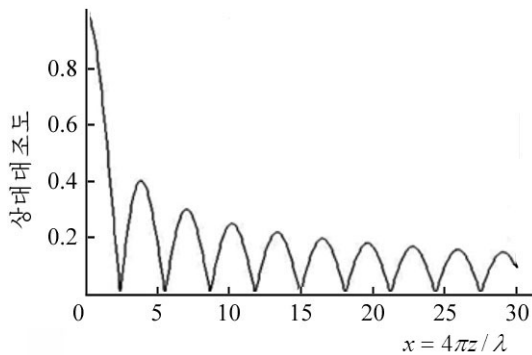


그림 1. 진동변위에 따르는 간섭무늬의 대조도변화

식 (4)에서 보는바와 같이 간섭무늬의 대조도는 측정점의 진폭을 변수로 하는 베셀함수와 연관되어있다.

진동변위에 따르는 간섭무늬의 대조도변화를 계산하면 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는바와 같이 $J_0(x)$ 값이 령으로 되는 순간에 간섭무늬는 사라지며(대조도는 령) 그 값이 극대인 때 무늬는 다시 뚜렷해진다. 그러나 그 대조도는 진동변위가 령인 때보다는 크게 낮아진다.

이것은 간섭무늬의 대조도변화를 관측하면

진동변위를 평가할수 있다는것을 의미한다.

2. 수자식마이켈손간섭계를 리용한 미소진동변위측정

수자식마이켈손간섭계에 CCD수감부와 수자화상처리장치를 받아들이면 각이한 진동변위에 따르는 간섭무늬의 대조도를 실시간으로 관정할수 있다.

우리는 반도체레이자를 광원으로 하는 수자식마이켈손간섭계(그림 2)를 제작하고 푸리에변환[2]을 리용하여 간섭무늬의 대조도를 실시간평가하는 방법으로 국부구역의 진동변위를 측정하였다. 간섭계의 광원은 파장이 650nm, 출력이 2mW인 반도체레이자이며 레이자빔은 현미경대물렌즈 MO와 그것의 초점면에 설치한 바늘구멍으로 이루어진 공간러파계를 지난다. 이때 바늘구멍을 초점거리가 65mm,

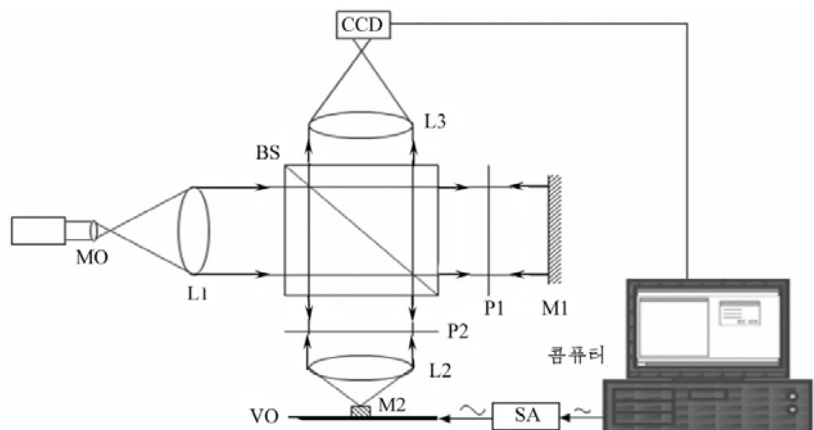


그림 2. 진동변위측정을 위한 수자식마이켈손간섭계의 광학계구조

직경이 30mm인 렌즈 L_1 의 뒤초점면에 놓아 크기가 확장된 평행광속을 형성하였다.

간섭무늬는 직경이 40mm, 평면도가 $\lambda/10$ 이하인 기준거울면 M_1 과 진동체에 붙인 거울면 M_2 에서 반사된 빛들사이에 형성된다. 광학계에서는 반사경로에 집초렌즈 L_3 을 설치하여 간섭하는 빛들이 모두 CCD수감면에 입사하도록 하였다. 간섭무늬의 대조도는 기준빛과 물체빛경로에 설치한 반파장판 P_1 , P_2 를 회전시켜 가능한것 높일수 있다. 한편 광학계에서는 컴퓨터내에서 발생시킨 표준진동신호를 증폭하여 진동체를 구동하도록 하였다.

진동체의 중심에 붙인 거울 M_2 의 직경은 5mm이며 두께는 1mm, 평면도는 $\lambda/10$ 이하, 매끈도는 $\lambda/50$ 정도이다. CCD에서 나오는 신호들은 수자화상결합부를 통하여 컴퓨터에 수자식으로 입력된다. 입력된 수자화상의 비트량자화수준은 8bit이며 크기는 720×576 화소이다.

수감한 간섭무늬의 세기분포는 회로잡음, 간섭무늬의 수자화과정에 생기는 잡음, 스펙트럼잡음 등과 수감부의 비선형성, 기생간섭무늬의 발생으로 하여 많은 경우 이상적인 코시누스형으로부터 이탈되며 고주파성분들이 포함되게 된다. 이때 간섭무늬의 세기분포는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$I(x, y) = \gamma(x, y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp[i(2\pi f_{ox}x + 2\pi f_{oy}y + n\phi(x, y))] \quad (5)$$

여기서 $\gamma(x, y)$ 는 무늬마당의 배경불균일성으로 하여 생기는 간섭무늬대조도의 분포를 의미하며 f_{ox}, f_{oy} 는 각각 x, y 방향에 따르는 간섭무늬의 반송주파수, A_n 은 해당하는 차수의 고주파성분들의 무게, $\phi(x, y)$ 는 기준파면과 물체파면의 형태를 반영하는 위상변조항이다.

간섭무늬세기분포를 푸리에변환하여 1차조화파에 해당하는 성분만을 취파한 다음 거울 푸리에변환을 진행하면 다음과 같은 기본주파수성분을 얻을수 있다.

$$\bar{I}(x, y) = A_1 \gamma(x, y) \exp[i(2\pi f_{ox}x + 2\pi f_{oy}y + \phi(x, y))] \quad (6)$$

물체가 외부로부터 조화신호를 받아 진동하는 경우 식 (6)에서 간섭무늬의 대조도를 반영하는 값인 $A_1 \gamma(x, y)$ 가 진동변위 z 에 따라 $J_0(4\pi z/\lambda)$ 에 비례하여 변한다.

이것은 간섭무늬를 푸리에해석한 결과의 절대값 즉 무늬변조정도 $m(x, y)$ 를 평가하면 그로부터 간섭무늬의 대조도변화를 알수 있다는것을 의미한다.

$$m(x, y) = |\bar{I}(x, y)| = A_1 \gamma(x, y) \quad (7)$$

실험에서는 진동체에 1 300Hz의 시누스형신호를 걸어주고 구동전압을 점차 높이면서 무늬대조도를 실시간으로 관측하였다. 무늬대조도는 진동변위가 령인 때의 최대변조값을 1로, 무늬가 완전히 사라지는 순간의 값을 령으로 표준화하고 평가하였다.

각이한 구동전압에 따르는 간섭무늬의 대조도변화는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 전압을 점차적으로 올릴 때 간섭무늬가 사라지는 순간이 반복적으로 나타나는데 이것은 그림 1

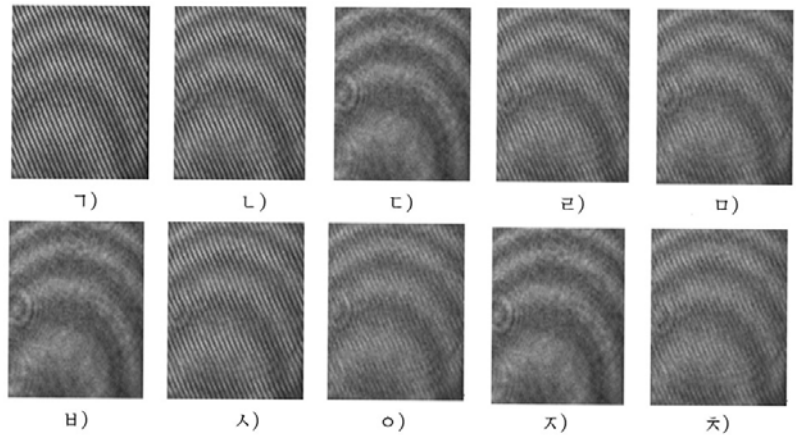


그림 3. 각이한 구동전압에 따르는 간섭무늬들의 대조도변화

가) $U=0V, m=1.0$, 나) $U=1.6V, m=0.8$, 다) $U=2.2V, m=0.1$, 라) $U=2.4V, m=0.5$, 마) $U=3.4V, m=0.4$, 바) $U=3.9V, m=0.1$, 사) $U=5.0V, m=0.6$, 오) $U=5.5V, m=0.2$, 자) $U=6.1V, m=0.1$, 차) $U=6.9V, m=0.3$

에서 보여준 자료에서 $J_0(4\pi z/\lambda)$ 의 값이 령과 같아지는 점에 해당한다. 즉 구동전압이 각각 2.2, 3.9, 6.1V인 때 진동변위는 0.12, 0.28, 0.45 μm 이다.

맺는 말

1) 수자식마이켈손간섭계를 제작하고 푸리에변환을 리용하여 간섭무늬의 대조도를 실시간평가하는 방식으로 $1\mu\text{m}$ 이하의 미소진동변위를 측정하는 방법을 확립하였다.

2) 간섭무늬세기분포를 푸리에변환하여 1차조화파에 해당하는 성분만을 리과한 다음 거꿀푸리에변환을 진행하면 무늬변조정도를 알수 있으며 그로부터 진동변위에 따르는 간섭무늬의 대조도변화를 관측할수 있다.

3) 구동전압을 점차적으로 올릴 때 간섭무늬가 사라지는 순간이 반복적으로 나타나는데 이것은 $J_0(4\pi/\lambda)$ 의 값이 령과 같아지는 점에 해당하며 이로부터 진동변위를 직접 측정할수 있다.

참고 문헌

- [1] T. Kreis; Handbook of Holographic Interferometry, Wiley-Vch Verlag, 23~56, 2005.
- [2] M. Takeda; Applied Optics, 52, 1, 253, 2013.
- [3] L. Krzemien et al.; Applied Optics, 51, 21, 34, 2012.

주체104(2015)년 5월 5일 원고접수

Measurement of Micro-Vibration Amplitudes by Digital Michelson Interferometer

Ro Ju Hyok, Kim Chol Su

A method for measurement of micro-vibration amplitudes less than 1 micrometer is suggested. It is based on real time estimation of contrast of interference fringe patterns captured from a digital Michelson interferometer by Fourier transformation. The fringe modulation, from which the change of fringe contrast can be observed attendant upon vibration amplitudes, can be obtained by filtering the fundamental frequency from Fourier spectra of interference fringe pattern and inverse Fourier transforming. The disappearing instances of fringe patterns which are equivalent to the zeros of $J_0(4\pi/\lambda)$ occur repeatedly with the increase of driving voltage and out of this the vibration amplitude can be directly measured.

Key words: micro-vibration amplitudes, digital Michelson interferometer