

## 시간평균간섭무늬의 푸리에해석에 기초한 압전사기재료의 미소진동측정

김철수, 강정철, 장경훈

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학연구기관들과 교육기관들에서 현대적인 검사기술수단, 계량계측수단들을 연구개발하기 위한 사업을 추진하면서 다른 나라들과의 교류와 협조를 통하여 발전된 검사수단들을 적극 받아들이도록 하여야 합니다.》

본문에서는 전자요소들과 음향기구들에서 중요하게 쓰이는 압전사기재료의 미소진동변위를 시간평균간섭법을 리용하여 측정하였다.

시간평균간섭법의 특징은 시간평균의 전제가 담보되는 조건에서 진동체의 주파수에 크게 의존하지 않는것이다.[1, 2] 아직까지 진동체의 특정한 점에서의 진동변위를 구동신호의 세기에 따라 구체적으로 측정할것이 없다. 본문에서는 시간평균간섭무늬의 대조도를 푸리에변환법으로 실시간해석하는 방식으로 미소진동변위를 직접 측정하는 방법에 대하여 논의하였다.

### 1. 측 정 원 리

일반적으로 간섭무늬의 빛세기분포  $I$ 는 다음과 같이 쓸수 있다.

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

여기서  $I_0$ 은 간섭무늬의 배경빛세기이며  $\gamma$ 는 무늬대조도,  $\Delta \phi$ 는 두 빛파사이의 위상차이다. 만약 간섭하는 두 빛중 하나가 조화진동하는 거울에서 반사된것이라면 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 최대진폭이며  $\omega$ 는 진동주파수이다. 이 경우 측정점으로부터 반사되어오는 빛파의 위상은 시간에 따라  $(2\pi/\lambda)2z \sin \omega t$ 로 변한다. 측정물체가 진동할 때 가림판면에서 간섭무늬의 세기분포는 기록시간  $T$ 동안에 수많은 간섭무늬들의 시간평균으로 표시할수 있다.

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

기록시간  $T$ 가 진동의 주기( $T' = 2\pi/\omega$ )에 비하여 대단히 크다고 가정하면( $T \gg 1/\omega$ ) 위의 식은 다음과 같이 다시 쓸수 있다.

$$I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T I_0 \left[ 1 + \gamma \cdot \cos \left( \Delta\phi + \frac{2\pi}{\lambda} 2z \sin \omega t \right) \right] dt =$$

$$= I_0 + I_0 \gamma \cos \Delta\phi \cdot \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \cos \left( \frac{4\pi z}{\lambda} \sin \omega t \right) dt \quad (4)$$

$J_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos(x \sin t) dt$  임을 고려하여 옷식을 정돈하면

$$I = I_0 \left[ 1 + \gamma \cdot J_0 \left( \frac{4\pi}{\lambda} z \right) \cos \Delta\phi \right] \quad (5)$$

이다. 여기서  $J_0(x)$ 는 1종의 령차베셀함수이다. 이 식에서 볼수 있는것처럼 간섭무늬의 대조도는 측정점의 진폭을 변수로 하는 베셀함수와 려관되여있다. 이것은 간섭무늬의 대조도를 평가하면 진동변위를 평가할수 있다는것을 의미한다. 그림 1에 진폭에 따르는 간섭무늬와 무늬대조도변화를 보여주었다.

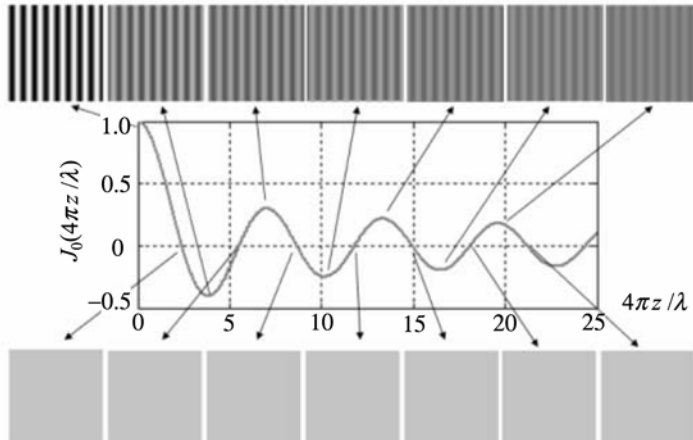


그림 1. 진폭에 따르는 간섭무늬와 무늬대조도변화

그림 1에서 보는것처럼 진폭이 특정한 값에 이르면 간섭무늬의 대조도는 령으로 된다. 즉 이 순간에 간섭무늬는 완전히 사라진다. 수자화상처리기술을 리용하여 무늬대조도가 극소인 위치를 밝혀내면 측정을 보다 세밀하게 할수 있다.

## 2. 푸리에변환법에 의한 간섭무늬의 실시간대조도평가

앞에서 언급한것처럼 진동측정을 위하여 논문에서 리용하려고 하는 방법에서 관건적인 것은 무늬대조도의 평가이다. 이를 위하여 제기된 합리적인 방법들중의 하나는 푸리에변환이다. 푸리에변환은 위상밀립법[3]에서와는 달리 간섭무늬에 반영된 위상이나 대조도의 해석에 하나의 무늬자료만이 요구되므로 측정의 실시간성을 보장하는데서 매우 효과적이다.

간섭계의 출구에 설치한 CCD에 맺어지는 무늬의 세기분포는 보통 다음과 같다.

$$I(x, y) = \gamma(x, y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\phi(x, y)]\} \quad (6)$$

여기서  $\gamma(x, y)$ 는 무늬마당의 세기불균일성으로 나타나는 대조도분포이며  $A_n$ 은 푸리에합렬의 무계결수,  $f_0$ 은 간섭무늬의 기본주파수,  $\phi(x, y)$ 는 물체면의 형태를 반영하는 위상분포항이다. 이 식을 푸리에변환하고 적당한 려파함수를 리용하여 1차조화주파수에 해당하는 구역을 선택려과한 다음 거울푸리에변환을 적용하면 다음과 같은 신호가 주어진다.

$$\hat{I}(x, y) = \gamma(x, y) A_1 \exp \{i[2\pi f_0 x + \phi(x, y)]\} \quad (7)$$

이 식의 절대값은 곧 해당 위치  $(x, y)$ 에서 1차조화주파수에 해당하는 무늬대조도(무늬변조)  $m(x, y)$ 이다.

$$m(x, y) = \gamma(x, y) A_1 \quad (8)$$

### 3. 측정광학계와 측정결과

론문에서는 진동측정을 위한 간섭계로 마이클슨간섭계를 설정하였다. 이 간섭계에서는 빛분할기를 중심으로 기준거울과 측정거울이 일정하게 떨어져있으므로 진동체를 간섭계의 본체와 분리시키기 쉽다.

진동측정용간섭계는 다른 유형의 간섭계와 일련의 차이를 가지고있다.

우선 진동측정용간섭계가 대상으로 하는것은 간섭무늬의 형태나 모양이 아니라 무늬대조도이다. 따라서 측정용거울의 결면형태가 비교적 나쁘다고 하여도 간섭무늬가 일정한 질적수준에서 높은 대조도를 가지고 형성되면 측정의 1차적인 요구는 만족되는것으로 본다. 다음으로 간섭무늬의 형성위치에 대한 요구에서 차이난다. 간섭무늬를 수감부에 직접 결상하면 시간에 따라 변하는 간섭무늬와 CCD의 주사시간이 동조되면서 개별적인 화소들이 출력하는 빛세기의 시간평균값이 시간에 따라 변할수 있다. 이러한 현상을 피하려면 무늬를 수감부가 아니라 비침판에 결상하고 그것을 다시 화상으로 변환하여야 한다. 점주사방식의 진동측정용 수자식마이클슨간섭계의 구조를 그림 2에 보여주었다.

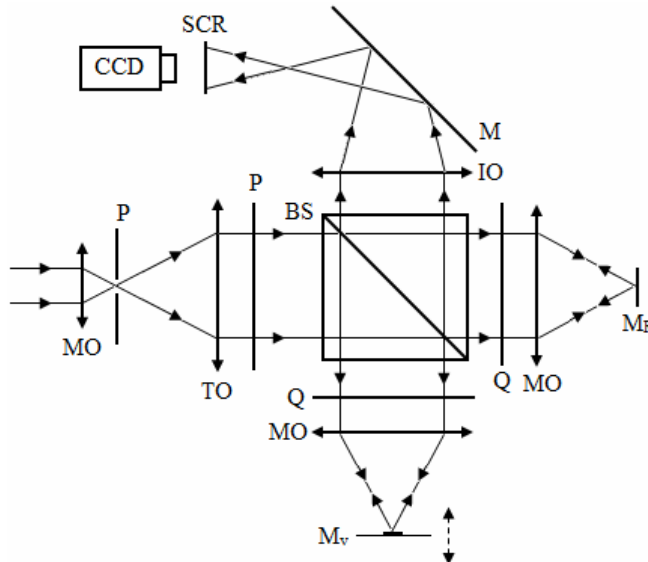


그림 2. 점주사방식의 진동측정용 수자식마이클슨간섭계의 구조

그림 2에서 레이자로부터 오는 빛은 공간려파기의 작용을 하는 바늘구멍(직경  $15\mu\text{m}$ )을

사이에 둔 현미경대물렌즈 MO(확대배율 20배)와 망원경대물렌즈 TO( $f=75\text{mm}$ ,  $f/4$ )로 구성된 평행광속계와 편광자를 지난다. 마이클슨형의 현미광학계는 빛분할기 BS와 2개의 현미경대물렌즈 MO(확대배율 4배), 기준거울  $M_R$ 와 진동거울  $M_V$ 로 구성되어있다. 진동거울은 압전 박막에 부착되어있으며 함수신호발생기에서 오는 신호로 구동된다. 현미경대물렌즈는 레이저빛을  $M_R$ 와  $M_V$ 에 집초시키며  $M_R$ 와  $M_V$ 의 특정한 점에서 반사된 빛은 간섭무늬를 형성하는데 그 영상은 렌즈 IO에 의하여 비침판 SCR에 맺힌다. CCD는 이 영상을 포착한다. 무늬대조도는 광학계의 반파장판 Q를 회전시켜 가능한것 높일수 있다.

진동체는 직경이 40mm, 두께가 0.2mm인 황동판에 부착시킨 직경이 25mm, 두께가 0.1mm인 고성기용PZT박막이며 그 중심에 직경이 3mm, 두께가 1mm인 작은 알루미늄 증착광학거울을 고착시켰다.

진동체의 변위특성을 표준급에서 정확하게 평가하려면 외부로부터 진동체에 주는 신호의 세기(실제로 구동전압)를 령부터 점차적으로 변화시키면서 신호대진동변위특성을 밝혀야 한다. 논문에서는 한소편컴퓨터기술을 리용하여 수자식가변저항기를 정밀하게 수조종하는 방식으로 진동체에 주는 조화진동신호의 세기를 련속적으로 변화시켰다.

MATLAB환경에서 Intel(R) Core(TM)i3 M380 2.53GHz(RAM 4GB)의 컴퓨터로 win7(64bit)조작체제에서 크기가 512×512화소인 1개 화상을 해석하는 속도는 1s당 100매정도로써 수자화상결합장치의 동화상입력속도 10~30fps에 비하여 대단히 빠르며 따라서 무늬해석의 실시간성이 주어진 실험조건에서 충분히 보장된다고 볼수 있다.

그림 3에 수자식신호구동장치를 리용하여 진동자에 걸어주는 구동전압을 0V부터 15V까지 선형으로 서서히 변화시키면서 관측한 각이한 주파수에서 무늬대조도변화곡선을 보여주었다.

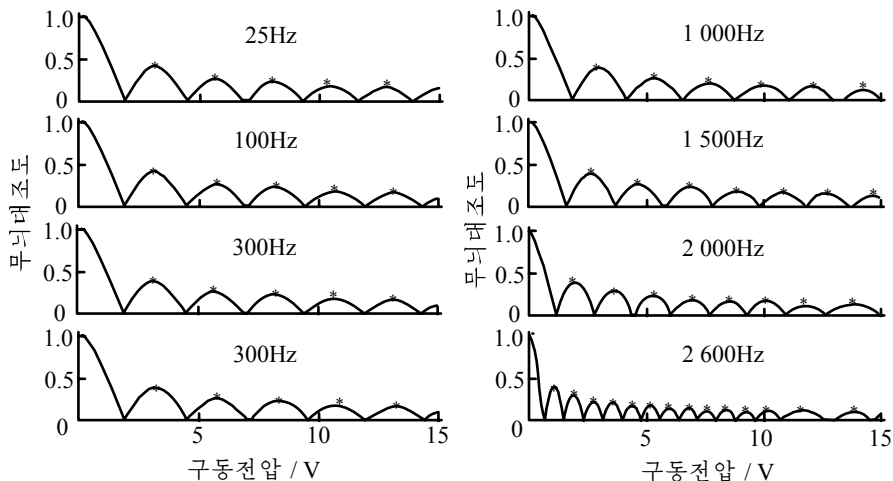


그림 3. 각이한 주파수에서 구동전압에 따르는 무늬대조도변화

우리는 그림 3에 보여준 대조도곡선에서 극소들에 대응한 진동변위를 령차베셀함수의 극소점들과 대비하는 방식으로 시험진동자의 구동전압—진동변위특성을 측정하였다.

그림 4에 100Hz부터 2 600Hz사이의 25개 주파수에서 측정한 시험진동체의 전압—진동변위특성을 보여주었다. 시험진동자는 1 500Hz까지의 주파수령역에서는 비교적 좋은 선

형의 전압-진동변위특성을 나타냈다. 하지만 그 이상에서부터는 일정한 전압이상에서 비선형성을 나타내기 시작하다가 2 600Hz근방에서는 8V부터 강한 비선형성을 나타냈다. 이 특성은 보다 높은 주파수에서 더 강하게 나타난다.

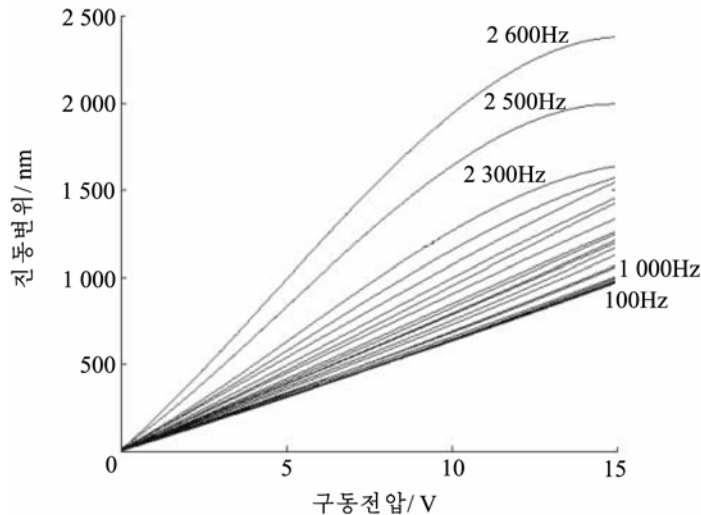


그림 4. 각이한 주파수대역에서 전압-진동변위특성

그림 5에 그림 4로부터 평가한 입구전압 3V에서 주파수에 따르는 시험진동자의 진동변위특성을 보여주었다. 시험진동자는 2 600Hz에서 뚜렷한 공진특성을 나타낸다.

### 맺는 말

시간평균간섭무늬의 실시간푸리에해석을 통하여 압전사기재료의 미소진동변위를 측정하였다.

1) 령차베셀함수에 따라 변하는 시간평균간섭무늬의 대조도를 푸리에변환법으로 실시간해석하는 방식으로 측정체의 미소진동변위를 평가할수 있다.

2) 논문에서 정한 압전사기박막의 미소진동변위측정구간은 0~2 500nm이며 2 600Hz에서 공진특성이 나타났다.

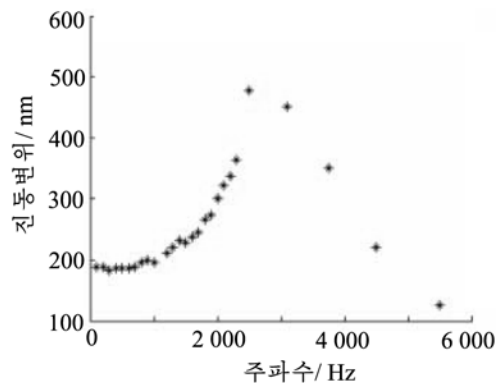


그림 5. 주파수에 따르는 시험진동자의 진동변위특성

### 참고 문헌

- [1] C. Y. Chang et al.; Opt. Lett., 36, 4281, 2011.
- [2] C. Y. Chang et al.; Appl. Opt., 51, 24, 5773, 2012.
- [3] L. Krzemien et al.; Appl. Opt., 51, 21, 5154, 2012.

## **Measurement of Small Vibration of PZT by Fourier Analysis of Time-Averaged Interference Fringe Pattern**

*Kim Chol Su, Kang Jong Chol and Jang Kyong Hun*

We measured the small vibration amplitudes of a PZT membrane by real time Fourier analysis of time-averaged interference fringe pattern.

The vibration amplitudes can be measured by comparing the contrast of time-averaged fringe pattern estimated in real time by Fourier transformation with the zero order of the Bessel function of the first kind. The possible measurement range of vibration is from 0 to about 2 500nm and the resonant frequency of the test specimen is considered at about 2 600Hz.

Key words: vibration measurement, interferometry