

## Mach-Zehnder 광섬유 간섭계를 이용한 압전형 진동발생기의 동특성 조사

### The Measurements of Vibration Displacement of the Piezoelectric Exciter Using Mach-Zehnder Optical Fiber Interferometer

조 승 일\* · 김 성 부\*\* · 이 종 규\*\* · 이 용 봉\*\*\* · 이 두 희†  
Seung Il Cho, Sung Boo Kim, Jong Kyu Lee, Yong Bong Lee  
and Doo Hee Lee

(2006년 8월 7일 접수 ; 2006년 9월 19일 심사완료)

Key Words : Calibration(교정), Piezoelectric Exciter(압전형 진동발생기), Mach-Zehnder Optical Fiber Interferometer(Mach-Zehnder 광섬유 간섭계)

#### ABSTRACT

The vibration exciter with the accurate calibration requires a low distortion along a single axis over a wide range of frequency. The fabricated piezoelectric exciter was composed of a base, piezoelectric element(Venitron PZT. 5A), electrode and seismic mass. Its performance characteristics is evaluated the Mach-Zehnder optical fiber interferometer. The phase of the optical wave passing through the optical fiber around the piezoelectric element was related the vibrational amplitude with a change of the applied sinusoidal voltage on the piezoelectric element. The dynamic characteristics of vibration exciter can be obtained by measuring the vibrational amplitude with a sinusoidal applied voltage on the piezoelectric element. The sensitivity of the fabricated piezoelectric exciter had a 0.4 nm/V which was uniform up to 20 kHz.

#### 1. 서 론

정밀측정이나 정밀가공 등 산업의 고도화에 따라 수반되는 제반문제의 하나로 진동문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 진동의 발생원인, 전달 경로 및 기계 구조물의 동특성 등을 파악해야 하며 이러한 과정에 필수적인 요소가 진동계측이며, 정밀한 진동계측을 위해서 진동 센서의 교정(calibration)이 요구된다.

진동 센서의 정확한 교정<sup>(1,2)</sup>을 위해서는 센서에 진동을 가해줄 수 있는 진동 발생 장치가 필요하다. 이러한 진동 발생 장치에는 중력장에서 여러 각도로 경사지게 기울일 수 있는 경사 지지대, 원심력, 회전교정, 전기역학식 진동발생기(electrodynamic vibration exciter), 압전형 진동발생기(piezoelectric exciter) 등 여러 가지가 있다<sup>(3)</sup>.

경사 지지대와 원심력은 0 Hz의 주파수에서 진동 센서를 교정하는데 사용되며, 회전교정은 지구의 중력장에서 0.5 Hz에서 45 Hz까지의 주파수 영역에서 진동 센서를 교정할 때 사용된다. 정밀 진동 측정용으로 사용되는 진동 가속도계의 교정을 위해서는 단일 축상을 따라 정현파 조화운동을 하는 전기역학식 진동발생기나 압전형 진동발생기가 사용된다. 전기역학식 진동발생기는 10 Hz에서 10 kHz까지의 주파

† 책임저자; 정회원, 한국표준과학연구원 기반표준부 역학그룹  
E-mail : dhlee@kriss.re.kr

Tel : (042)868-5309, Fax : (042)868-5643

\* 정회원, 부경대학교 물리학과

\*\* 부경대학교 물리학과

\*\*\* 한국표준과학연구원 기반표준부 역학그룹

수 영역에서 사용되고, 10 kHz 이상의 고주파수 영역에서는 인가되는 전압에 비례하여 압전소자가 변형되는 현상, 즉 압전효과를 이용하는 압전형 진동발생기를 사용하여 진동 센서를 교정한다. 이러한 진동발생기들을 교정에 사용하기 위해서는 그 자체의 동특성을 파악할 필요가 있다.

진동발생기의 동특성은 일정 전압 또는 전류로 구동시킨 상태에서 주파수에 따른 진동 변위를 측정함으로써 구할 수 있다. 진동 변위를 측정하는 방법으로 여러 가지 기술이 사용되어 왔으나 광학 간섭계를 이용하는 방법이 가장 일반적이고 정밀한 것으로 인식되고 있다. 광학 간섭계를 사용하여 진동 진폭을 측정하는 방법으로 진동 변위가 큰 저주파수 영역에서는 간섭무늬 수 측정 방법(fringe counting method)<sup>(4-6)</sup>, 진동 변위가 작은 경우에는 Bessel 함수 방법(Bessel function method)<sup>(7-14)</sup> 등이 연구되어왔다. Bessel 함수 방법에는 간섭무늬 소멸법(fringe disappearance method)과 Bessel 함수비 방법(Bessel function ratio method)이 있다.

간섭무늬 소멸법<sup>(7-10)</sup>은 미소 진동 측정을 위해 만들어졌지만, 특정한 진폭값에서만 사용할 수 있다. Michelson 간섭계에서 광원으로 He-Ne 레이저(파장  $\lambda = 632.8$  nm)를 사용할 경우, 1차 Bessel 함수  $J_1$ 이 첫 번째로 0이 되는 진동 변위는 193 nm로 주어진다. 그리고, Bessel 함수비 방법<sup>(11-14)</sup>은 이들 진폭을 속박하지 않고, 200 nm이하의 진동 진폭도 측정할 수 있지만, 일반적으로 복잡한 계산이 요구된다. Clark<sup>(14)</sup>은 0.1 nm의 정확성을 가지고 2 nm에서 255 nm 범위에서 진동 진폭을 측정할 수 있는 Bessel 함수비 방법을 설명했다.

이 논문에서는 1 kHz ~ 20 kHz의 주파수 영역에서 진동 센서의 교정과 동특성 평가에 사용할 수 있는 압전형 진동발생기를 제작하였고, 이것의 특성을 파악하기 위해 Mach-Zehnder 광섬유 간섭계를 이용하여 주파수에 따른 변위 응답특성을 구하였다. Mach-Zehnder 광섬유 간섭계에서 압전소자(vernitron PZT 5A)에 감겨진 광섬유를 통과하는 광파는 압전소자에 가해지는 전압에 따라 위상이 변한다. Bessel 함수비 방법을 사용하여 간섭신호의 스펙트럼을 구하여 Bessel 함수표로부터 위상변화량을 찾아 반경 방향에 대한 진동진폭을 구하였고, 또한 압전형 진동발생기의 수직방향의 진동진폭을 구하기 위해 이두

회 등<sup>(1,2)</sup>이 이용한 Michelson 간섭계를 사용하였다.

## 2. Mach-Zehnder 광섬유 간섭계

Mach-Zehnder형 광섬유 간섭계는 Fig. 1과 같이 구성된다. 가간섭성 광원인 레이저광은 광분할기(beam splitter)나 지향성 결합기(directional coupler)에 의해 둘로 나누어져 일부는 기준 광섬유(reference fiber)로 다른 일부는 센서 광섬유(sensing fiber)로 보내진다.

센서 광섬유를 통과하는 광파의 시간  $t$ 에 따른 위상은 압전소자에 가해지는 전압에 따라 다음과 같이 변조된다.

$$\phi(t) = \zeta \cos \Omega t \quad (1)$$

여기서  $\zeta$ 는 압전소자에 감겨진 센서 광섬유의 길이와 인가전압의 크기 및 Poisson비에 따라 정해지는 상수이며,  $\Omega$ 는 인가전압의 각주파수이다.

광 결합기(optical combiner) 전단에서 기준 광섬유를 거쳐 나온 기준광의 전기장은

$$E_r = A_r \exp j[\omega t + \phi_r] \quad (2)$$

이고, 센서 광섬유를 거쳐 나온 신호광의 전기장은

$$E_s = A_s \exp j[\omega t + \phi(t) + \phi_s] \quad (3)$$

이다. 여기서,  $\omega$ 는 광파의 각주파수이고,  $\phi_r$ 과  $\phi_s$ 는 기준광과 신호광의 임의의 위상 요소로써 주위의 온도 변화 등에 의해 변화될 수 있다.

이들 두 광파는 광 결합기에 의해 합성되어 간섭무늬를 이루게 되며, 이를 광검출기(photodetector)로 검출하면 광세기에 비례하여 나오는 전기신호  $I(t)$ 는 다음 식으로 주어진다.

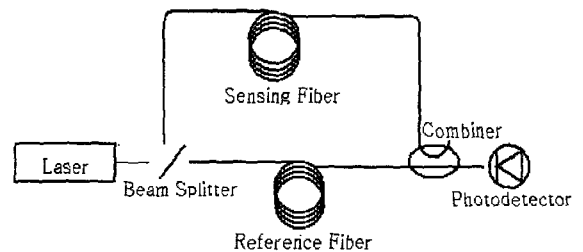


Fig. 1 Mach-Zehnder optical fiber interferometer

$$\begin{aligned}
 I(t) &= A[1 + B \cos(\zeta \cos \Omega t + \phi_s - \phi_r)] \\
 &= A[1 + B\{\cos(\zeta \cos \Omega t) \cos(\phi_s - \phi_r) \\
 &\quad - \sin(\zeta \sin \Omega t) \sin(\phi_s - \phi_r)\}] \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서  $A$ 는 입력되는 광파위에 비례하는 상수이고,  $B$ 는 광파의 편광상태(polarization state)에 따라 정해지는 상수이다.

일반적으로 압전소자의 직경 변화에 의한 신호광의 위상 변화  $\zeta$ 는 그 값이 매우 작다. 따라서 식 (4)의 여현항은 Fig. 2에서 보는 것처럼  $\phi_s - \phi_r$ 에 따라 그 크기가 크게 좌우된다.  $\phi_s - \phi_r = \pi/2 \pm 2m\pi$  ( $m =$  정수)의 직각조건이 만족될 때 신호의 크기는 최대가 되며, 직각조건에서 벗어날수록 신호의 크기는 작아지고 찌그러진다.

식 (4)의 광세기  $I(t)$ 를  $\cos \Omega t$ 를 변수로 갖는 삼각함수를 Fourier 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 I(t) &= A[1 + B \cos(\phi_s - \phi_r) J_0(\zeta) \\
 &\quad + 2B \sin(\phi_s - \phi_r) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}(\zeta) \cos(2n-1)\Omega t \\
 &\quad + 2B \cos(\phi_s - \phi_r) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\zeta) \cos(2n\Omega t)] \quad (5)
 \end{aligned}$$

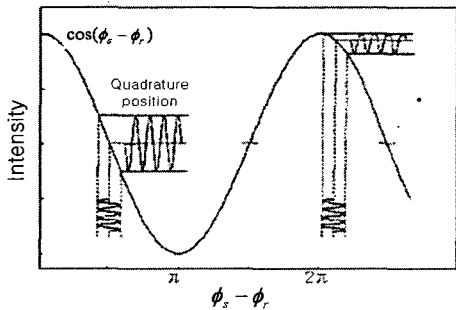


Fig. 2 Intensity variation as function of  $\phi_s - \phi_r$

Table 1 Bessel function table

$\zeta$	$\xi_0$	$J_1(\zeta)$	$J_3(\zeta)$	$J_3(\zeta)/J_1(\zeta)$
...	...	...	...	...
0.395	19.89087	0.19367	0.00127	0.00657
0.400	20.14265	0.19603	0.00132	0.00673
0.405	20.39443	0.19838	0.00137	0.00691
...	...	...	...	...

간섭계가  $\phi_s - \phi_r = \pi/2 \pm 2m\pi$  ( $m =$  정수)의 직각 조건에서 동작하지 않는 경우, 식 (5)에서 볼 수 있듯이  $\cos(\phi_s - \phi_r)$ 과  $\sin(\phi_s - \phi_r)$ 는 임의의 값을 갖는다. 이러한 경우에는 두 개의 고조파 성분의 비 즉,  $J_3(\zeta)/J_1(\zeta)$ 와  $J_4(\zeta)/J_2(\zeta)$ 가 어떤 일정한 값을 갖기 때문에 간섭신호의 스펙트럼으로부터 이들 비를 측정하여 Bessel 함수표(Table 1)로부터 위상변화량  $\zeta$ 를 찾아 진동진폭( $\xi_0$ )을 구할 수 있다.

### 3. 제작 및 실험방법

#### 3.1 압전형 진동발생기의 제작

압전형 진동발생기는 압전소자에 전압을 인가하면 압전효과에 의해 인가되는 전압에 비례하여 압전소자의 두께가 변화되는 현상을 이용하여 만들어진다. 베이스와 관성질량 사이에 있는 압전소자는 전기신호를 진동신호로 바꾸어주는 변환기로서 이상적인 탄성 스프링 역할을 한다.

이 연구에서는 Fig. 3과 같이 외경이 25 mm, 내경이 10 mm, 두께가 2.5 mm인 링 형태의 압전소자(Vernitron PZT-5A)를 사용하여 압축식 압전형 진

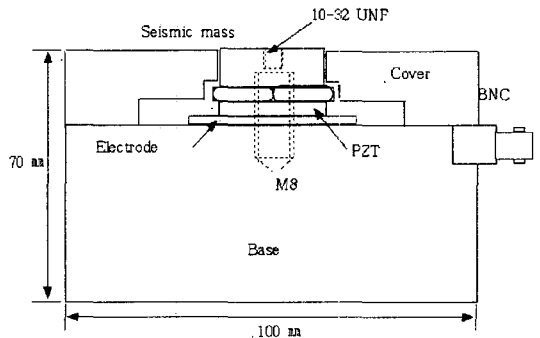


Fig. 3 Dimensions of designed piezoelectric exciter

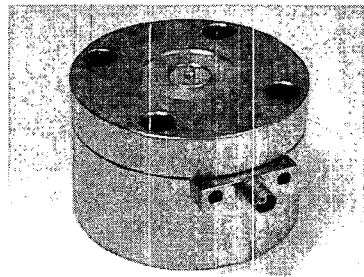


Fig. 4 Photograph of fabricated piezoelectric exciter

동발생기를 제작하였고, 압전소자와 전극용 기판을 베이스 윗면과 관성질량 사이에 고정시키기 위해 중심부에서 볼트로 고정하는 방식으로 설계하였다. Fig. 4는 실제 제작한 압전형 진동발생기의 사진을 나타낸 것이다.

전극을 연결하기 위한 인쇄회로 기판(PCB plate)을 제외한 모든 부분의 재질은 스테인레스 스틸(SUS410)을 사용하였다. 관성질량의 설치 면에 10-32 UNF 나사산을 가공하여 상용으로 시판되는 가속도계를 스태드(stud)를 사용하여 쉽게 설치할 수 있도록 하였다. 압전소자와 전극용 기판이 베이스 윗면과 관성질량 사이에 단단히 고정되도록 M8 볼트를 사용하여 결합시켰다. 압전형 진동발생기의 감쇠비는 0.1 이하의 작은 값을 갖기 때문에 제작된 압전형 진동발생기는 Fig. 5와 같이 관성질량과 베이스 사이에 압전소자, 전극용 기판, 체결용 볼트가 직렬 및 병렬로 연결되어 있는 진동계로 볼 수 있다.

이러한 진동계의 공진 주파수  $f_n$ 은

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_s}} \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $m_s$ 는 관성질량의 질량,  $k$ 는 총 강성(total stiffness)이다.

총 강성은

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} + k_3 \quad (7)$$

로 나타낼 수 있고,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 는 각각 압전소자, 전극용 기판, 체결용 볼트의 강성이다. 이들 강성은

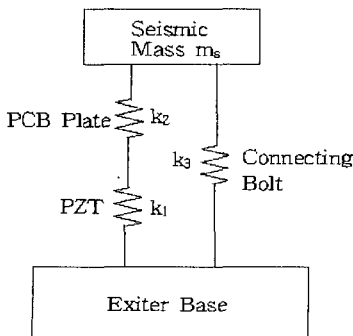


Fig. 5 Mechanical equivalence of the piezoelectric exciter

재질의 영률(Young's modulus)과 외형 치수로부터 구할 수 있다.

$$k = \frac{E \cdot A}{t} \quad (8)$$

여기서  $E$ 는 재질의 영률,  $A$ 는 재질의 단면적,  $t$ 는 재질의 두께이다.

제작된 압전형 진동 가진기에서 압전소자의 강성  $k_1$ 은  $1.26 \times 10^{10}$  N/m이며 외경이 40 mm, 내경이 10 mm, 두께가 0.5 mm인 전극용 기판의 강성  $k_2$ 는  $0.47 \times 10^{10}$  N/m 그리고 결합용 볼트(M8)의 강성  $k_3$ 는  $0.15 \times 10^{10}$  N/m 정도의 값을 갖는다. 식 (7)로부터 총 강성  $k$ 는  $0.492 \times 10^{10}$  N/m이며, 관성질량의 질량이 20 g이므로 공진주파수는 78.9 kHz 정도가 된다.

한편, 외경이  $D$ 인 압전소자의 hoop mode 공진 주파수  $f_r$ 은 영률  $E$ 와 밀도  $\rho$  사이에 다음의 관계가 있다<sup>(15)</sup>.

$$f_r = \frac{1}{\pi D} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (9)$$

제작된 진동발생기에 사용된 압전소자의 외경  $D$ 는 25 mm, 영률  $E$ 와 밀도  $\rho$ 는 각각  $7.65 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>와  $7.75 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>이므로  $f_r$ 은 약 40 kHz 가 된다.

### 3.2 실험방법

제작된 압전형 진동발생기의 응답특성을 보기 위해 Fig. 6와 같이 광섬유 Mach-Zehnder형 간섭계를 구성하였다. 코아 직경 3.88  $\mu$ m, 클래드 직경

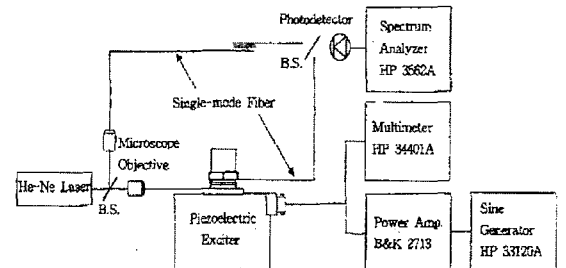


Fig. 6 Mach-Zehnder fiber-optic interferometer for measurement of performance characteristics of the fabricated piezoelectric exciter

89.50  $\mu\text{m}$ , 코팅 직경이 245  $\mu\text{m}$ 인 단일모드 광섬유를 사용하여 압전소자의 직경 방향으로 광섬유를 빈틈없이 감았다(10회).

He-Ne 레이저에서 나온 광은 광분파기에 의해 둘로 나누어져 일부는 기준 광섬유로 다른 일부는 압전소자에 감겨져 있는 센서 광섬유로 보내어 진다. 신호발생기(signal generator, HP 33120A)에서 정현파를 발생시켜 증폭기를 통해 진동발생기를 구동시켰다. 이때 구동전압은 50 V로 일정하게 유지시켰고, 가진주파수는 1 kHz ~ 50 kHz까지 측정하였다. 광 검출기(Newport 875 PIN detector)를 사용하여 얻어진 출력신호는 주파수 분석기(spectrum analyzer HP3562A)에서 간섭신호의 고조파 성분  $V_1$ 과  $V_3$ 를 측정하여  $V_3/V_1 (= J_3/J_1)$ 의 비를 계산한 후, Bessel 함수표에서 해당 위상을 찾아 진동 변위를 구하였다.

#### 4. 결과 및 분석

Fig. 7은 압전형 진동발생기에 1 kHz, 50 V의 일정한 정현파를 가했을 경우 측정된 간섭계 출력신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 그림에 나타난 것과 같이  $J_3(\xi)/J_1(\xi) = 0.12434/18.811 = 0.00661$ 이며, Bessel 함수표(Table 1)로부터 위상  $\xi$ 가 0.39625임을 알 수 있다. 이 위상 변화량에 해당하는 진동 변위를 Bessel 함수표를 이용하여 구하였다.

Michelson 간섭계를 이용<sup>(1,2)</sup>하여 제작한 진동발생기의 수직한 진동진폭 값과 Mach-Zehnder 광섬유

간섭계로 구한 반경방향의 진동진폭 값을 비교한 결과 그 비는 0.9223로 나타났다. Fig. 8은 제작한 압전형 진동발생기의 주파수에 따른 두께 방향의 변위 응답특성을 보여준다. 이 결과에서 압전형 진동발생기의 운동 부분에 시험체를 올려놓지 않은 상태에서의 자체 공진 주파수는 42 kHz이며, 이것은 hoop mode 공진 주파수 40 kHz와 거의 일치한다. 32 kHz 근방의 이상 공진은 전극, 압전소자 및 관성질량의 면들 사이에 존재하는 접합강성에 의한 것으로 추정되며, 제작된 진동발생기는 20 kHz 까지는 평탄한 변위 응답특성을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 1 kHz에서 진동발생기의 가진 전압에 대한 변위 특성을 나타낸 것으로, 양호한 선형성을 갖고 있다는 것을 알 수 있다.

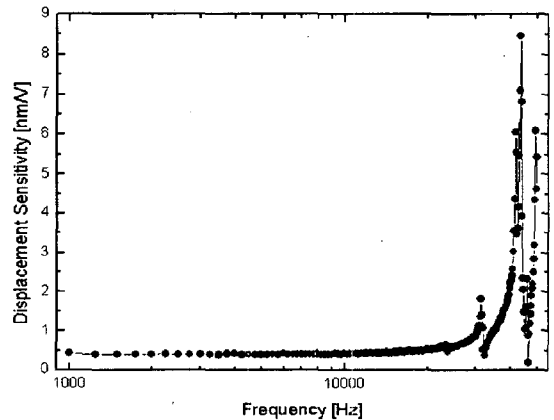


Fig. 8 Frequency response of the fabricated piezoelectric exciter

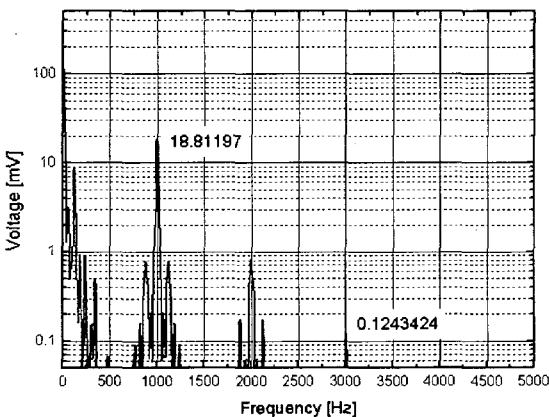


Fig. 7 Frequency spectrum of interferometer output signal

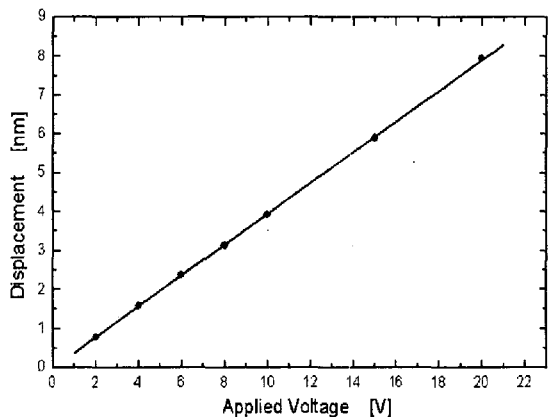


Fig. 9 Linearity of the fabricated piezoelectric exciter

압전형 진동발생기가 Fig. 8에서 보는 바와 같이 단위 전압 당 진동 변위가 0.4 nm로 거의 일정하기 때문에 가진 전압을 일정하게 유지하는 경우에는 진동발생기에서 발생하는 가속도는 가진 주파수의 제곱에 비례하게 된다. 가진 전압을 10 V로 주었을 때, 1 kHz에서  $0.16 \text{ m/s}^2$ , 10 kHz에서는  $16 \text{ m/s}^2$  정도의 가속도 크기를 얻을 수 있다.

시험 대상 가속도계를 올려놓는 경우 시스템의 공진 주파수는 다음과 같이 변화한다.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_s + m_a}} \quad (10)$$

여기서  $m_s$ 와  $m_a$ 는 각각 압전형 진동발생기의 운동부분의 질량과 그 위에 올려지는 시험 대상 가속도계의 질량이다. 압전형 진동발생기의 운동 부분에 올려지는 시험 대상 가속도계의 무게에 의해 압전형 진동 가진기의 공진주파수 낮아지지만 제작된 압전형 진동발생기는 운동 부분의 무게가 20 g으로 기준 가속도계의 무게가 40 g 정도인 것을 감안하더라도 20 kHz까지는 충분한 가진 능력을 갖는 것으로 판단된다. 그러므로 제작된 진동발생기는 1 kHz ~ 20 kHz의 주파수 영역에서 진동 측정용 센서의 교정이 나 주파수 응답특성을 조사하는데 적합한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

외경이 25 mm, 내경이 10 mm, 두께가 2.5 mm인 압전소자(Venitron PZT 5A)를 사용하여 1 kHz에서 20 kHz의 주파수 영역에서 진동 센서의 교정이 나 특성 평가를 위한 압전형 진동발생기를 제작하였다. 이 압전형 진동발생기의 주파수에 따른 진동 변위를 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 이용해서 조사하였다. 압전소자의 직경 방향으로 감겨진 광섬유를 통과하는 광파는 압전소자에 가해지는 전압에 따라 위상이 변화되고, 이것은 진동 변위와 연관된다.

제작된 진동발생기의 주파수에 따른 변위 응답특성을 조사한 결과, 20 kHz 까지는 0.4 nm/V 정도의 평탄한 변위/전압 특성을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 제작된 압전형 진동발생기는 1 kHz에서 20

kHz의 주파수 영역에서 진동 측정용 센서의 교정과정 특성 평가에 적합하다는 것을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) Lee, D. H., Cho, S. I., Lee, Y. B., Jeon, B. S. and Lee, J. K., 2005, "Automation of Primary Vibration Calibration System Using Laser Interferometer", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 11, pp. 1084~1091.
- (2) Lee, D. H., Lee, Y. B. and Jeon, B. S., 2001, "Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry", Proceedings of the KSNVE Autumn Conference, pp. 1356~1360.
- (3) Cyril M. Harris and Allan G. piersol, "Harris Shock and Vibration Handbook", (McGraw-Hill, Fifth Edition 2002), Chap. 18, 25.
- (4) Bowie, G. E., 1963, Appl. Optics, 2, 1061.
- (5) Martens, H. J., 1987, Metrologia, 24, 163.
- (6) Mohanan, V., Roy, B. K. and Chitnis, V. T., 1989, Appl. Acoustics, 28, 95.
- (7) Ziegler, C. A., 1953, J. Acoust. Soc. Am., 25, 135.
- (8) Schmidt, V. A., Edeiman, S., Smith, E. R. and Jones, E., 1961, J. Acoust. Soc. Am., 33, 748.
- (9) Schmidt, V. A., Edeiman, S., Smith, E. R. and Pierces, E. T., 1962, J. Acoust. Soc. Am. 34, 455.
- (10) Goldberg, J. L., 1971, Metrologia, 7, 87.
- (11) Clark, N. H., 1983, Metrologia, 19, 103.
- (12) Deferrari, H. A., Darby, R. A. and Andrews, F. A., 1967, J. Acoust. Soc. Am., 42, 982.
- (13) Actley, R. A. and Logue, H. A., 1967, Proc. Inst. Environ. Sci., 1, 235.
- (14) Clark, N. H., 1989, Metrologia, 26, 127.
- (15) Cyril M. Harris and Allan G. piersol, It Harris Shock and Vibration Handbook, (McGraw-Hill, Fifth Edition 2002), Chap. 7.