

자기 변형 공진 기구를 이용한 레이저 스캐닝 진동 측정기에 관한 연구

이정화*, 류제길**, 박기환***

A Study on a Laser Scanning Vibrometer Using a Magnetostrictive Resonant Device

Jung-Hwa Lee,* Je-Kil Ryu**, Kyihwan Park***

ABSTRACT

A low power consuming laser scanning vibrometer is studied for its development. For its optical system, a laser interferometer is constructed to use the Doppler effect. In order to reduce the driving power of the scanning system, a small displacement of the scanning system is produced, which is achieved by using a magnetostrictive actuator. A sufficient rotating angle of the scanning system is obtained by using an amplified displacement from the resonant phenomena of a second order mechanical system composed of a mass and spring. The control of the magnetostrictive actuator using a Terfenol-D is performed without using a feedback system to help reduce the power consumption. The vibration analysis is made for the sinusoidal scanning input to have the space domain information from the time domain of the velocity of a vibration object. As a partial work of development of a low power consuming laser scanning vibrometer, in this work, a scanning system which has the above features is developed and experimentally investigated. For the purpose of the optical system calibration, the vibration measurement for one axis is presented and the future works are discussed.

Key Words : Laser Scanning Vibrometer(레이저 스캐닝 진동측정기), Interferometer(간섭계), Doppler Effect(도플러 효과), Resonant Scanner(공진스캐너), Sinusoidal Scanning(정현가진스캐너), Magnetostrictive Material(자기변형소자), Terfenol-D Actuator(터페놀 액츄에이터)

1. 서 론

구조물의 설계 작업에 있어서 시스템의 동적 거동을 예상하고 이해하기 위하여 동특성(dynamic characteris-

tics)을 규명하는 것은 상당히 중요한 일이다. 이러한 동특성은 진동 테스트로부터 구해지는 고유진동수와 진동 모드를 통해 어느 정도 규명되어진다¹⁾. 진동 테스트에서 많이 사용되는 방식은 가속도계를 사용하여 일련의 지점

* 삼성전기 광메카 연구실
** 광주과학기술원 기전공학과 대학원
*** 광주과학기술원 기전공학과

에서의 응답을 측정하는 것이다. 측정된 응답 특성은 입력 신호와 함께 모드 분석 시스템(modal analysis system)에 의해 신호처리 되어 동특성을 나타내게 된다. 그러나 접촉식 센서인 가속도계를 소형, 경량 구조물의 진동 측정에 사용할 경우에는 센서의 국부하중(local loading)으로 인해 시스템 동특성에 오차를 줄 수 있으므로 사용이 용이하지 않다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 기술의 발달로 점점 더 소형화, 경량화 되어 가는 구조물의 진동 측정을 위하여 레이저 간섭에 의한 비접촉 측정을 이루고, 일련의 지점에서의 응답 측정을 위한 다수 센서 사용에 따른 불편함을 해결하기 위하여 스캐닝 시스템 개발에 관한 기초 연구를 수행한다.

진동 측정을 위한 레이저 간섭 기술에는 전자스펙클 간섭법(ESPI)⁽³⁾과 모아레 간섭법⁽⁴⁾, 레이저 도플러 주파수 천이를 이용한 방법⁽⁵⁾ 등이 있다. 앞의 두 방법은 레이저 빔을 광학 소자를 이용하여 물체에 투영시키고, 물체의 진동에 따라 변화하는 간섭무늬(interferogram)를 CCD 카메라로 기록하고 이미지 해석에 의해 간섭무늬를 계수하여 진동을 표현한다. 이 방법은 일정 면적에서의 진동 측정이 가능하나, 주변의 외란(disturbance)이 심하면 오차가 발생할 수 있으며 시간평균법(time average method)을 사용하여 진동 진폭만을 측정하므로, 진동 방향에 대한 판별이 필요 없으며 미소 진동 진폭을 갖는 복합재료의 고유진동수나 진동모드, 응력 등의 측정에 이용된다. 도플러 주파수 천이를 이용한 방법은 주파수 변화로부터 속도를 측정하므로 간섭무늬 해석방식보다 외란에 강하며, 구성하는 간섭계(interferometry)에 따라 진동방향판별과 수m/s의 속도 측정이 가능하므로 구조물의 진동 측정에 적당하다. 이러한 간섭계에 스캐닝 시스템을 결합하여, 다수센서 사용에 따른 불편함을 해결하며 비접촉의 정밀 측정을 이루기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 이 중 Durst⁽⁶⁾는 상용 스캐너에 미러를 부착하여 스캐닝을 함으로써 유체의 속도 분포를 측정하였다. 상용 스캐너는 대략 2~7ms의 응답 특성을 가지고 있으며, 베어링 지지에 의한 스프링 회전자 위치 센서에 의한 위치 제어로 스캐닝이 이루어진다. Sriram⁽⁶⁾은 스캐닝 미러를 가진기로 정현 가진하여 위치 제어 없이 원판 디스크 상에서의 속도 분포를 측정하였는데, 가진기에 의한 스캐닝은 스캐닝부 크기가 커질 수 있는 단점이 있다. Makoto⁽⁷⁾는 전계에 의해 변위를 발생하는 압전소자(piezoelectric material)를 이용하여 고정밀의 레이저 스캐너를 개발하였다. 개발된 레이저 스캐너는 위치 제어로 히

스테리시스(hysteresis)를 줄이고, 지레의 원리를 이용하여 6.1mrad(0.35°)의 스캔각을 얻었다.

본 연구에서 개발하고자 하는 간섭계는 광음향소자(acousto optic modulator)를 사용하여 진동 방향 판별을 가능하게 하고, 구조물의 면외(out-of-plane) 진동 측정에 적당한 기준빔 방식(reference beam arrangement)의 간섭계를 구성하는 것이다. 스캐닝 시스템은 상용 스캐너보다 적은 전력을 소모하면서 충분한 스캔각을 갖도록 하였다. 적은 전력을 소모하기 위해서는 작동거리 변화가 작아야 유리하고 제어시의 전력을 최대한 줄여야 한다. 이를 위하여 미소변위로부터 원하는 스캐닝각을 얻기 위하여 공진에 의한 변위증폭원리를 이용하고 위치제어가 필요 없게 스캐닝 시스템을 구성하였다. 본 연구에서 정밀 가진을 위해 사용된 액츄에이터는 자계에 의해 변위를 발생하는 자기변형소자(magnetostrictive material)인 터페놀(Terfenol-D)로 구현한다. 터페놀 액츄에이터는 10 μ s의 빠른 응답특성과 6KHz에 달하는 높은 bandwidth를 가지고 있으며, 압전소자의 10여배에 달하는 변위를 발생하므로 더 큰 스캐닝 각을 얻을 수 있다.

연구의 최종 목표는 간섭계와 스캐닝 시스템을 결합한 진동 측정기를 개발하여 진동체의 진동을 측정하고 이로부터 동특성을 유출해내는 것이다. 본 논문은 이러한 연구의 일부분으로, 구조체 진동 측정을 위한 간섭계를 구성하여 경량 미러에 대한 1축 진동 측정이 실현되었으며, 저전력이며 위치제어가 필요 없는 스캐닝 시스템에 대한 개발과 가능성이 제시되었다.

2. 진동 측정기의 간섭계

진동 측정기는 그림 1에 나타난 것처럼 크게 네 부분으로 구성된다. 고감도, 비접촉의 측정에 가장 중요한 부분인 간섭계와 단일 센서로 다 지점 측정을 이루기 위한 스캐닝 시스템, 간섭신호를 처리하는 신호처리부와 진동데이터 추출부로 구성된다. 진동 측정기의 하드웨어에 해당하는 간섭계와 스캐닝 시스템으로부터의 출력은 광 검출기에 의해 전기신호로 바뀐다. 이 신호는 방향판별을 위해 사용된 음광향 소자에 의해 변조된 신호이므로, 신호처리부에서 여러 단계 걸쳐 필터링 및 증폭되어 원래의 신호로 복조 된다. 진동데이터 추출부에서는 신호를 주파수 영역에서 분석하여, 체비셰프 다항식의 공간과 시간의 속도식으로 표현하는데, 이로부터 진동모드 추출이 가능하다.

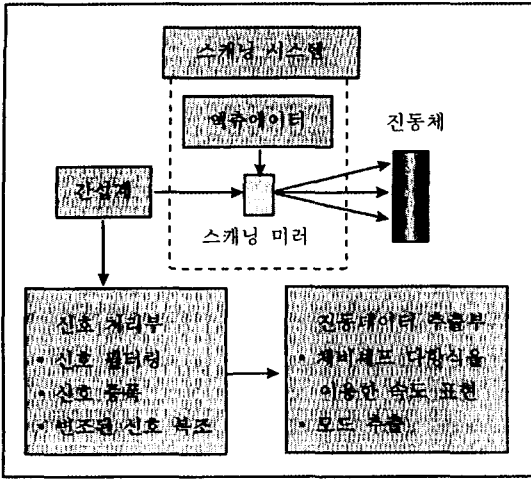


Fig. 1 Schematic configuration of the vibrometer

빛은 전자기파의 일종으로 진폭 U_0 와 위상 Φ_0 주파수 f_i , 시간 t 에 대하여 다음과 같이 표현된다.

$$\Psi = U_0 e^{i(\Phi_0 - 2\pi f_i t)} \quad (1)$$

간섭계에서 식(2.a)와 식(2.b)로 표현된 빛 Ψ_1 과 Ψ_2 가 교차하면 간섭현상이 일어나며, 전자기파의 이론에 의해 식(3)과 같이 단순한 합으로 나타난다.

$$\Psi_1 = U_1 e^{i(\Phi_1 - 2\pi f_1 t)} \quad (2.a)$$

$$\Psi_2 = U_2 e^{i(\Phi_2 - 2\pi f_2 t)} \quad (2.b)$$

$$\Psi_{interference} = \Psi_1 + \Psi_2 \quad (3)$$

이러한 간섭은 광 검출기에 의하여 간섭신호의 절대값의 제곱에 비례하는 강도 I 로 측정된다.

$$\begin{aligned} I &= |\Psi_{interference}|^2 = |\Psi_1 + \Psi_2|^2 \quad (4) \\ &= \Psi_1^2 + \Psi_2^2 + 2\Psi_1\Psi_2 \cos(\Phi_1 - \Phi_2 - 2\pi(f_1 - f_2)t) \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi_1 - \Phi_2 - 2\pi(f_1 - f_2)t) \end{aligned}$$

간섭현상을 위한 간섭계는 그림 2에 제시된 것과 같이 광원(Laser)과 빔 분할장치(BS1, BS2), 브랙셀(AOM), 빔 합성장치(BS3), 미러(M), 광 검출기(detector) 등으로 이루어지며, 응용에 따라 여러 가지 방식으로 구성된다. 이 간섭계는 구조물의 진동 측정을 위해 제안된 기준 빔 방식의 간섭계로, 광 경로차 측정을 위해 사용되는 마

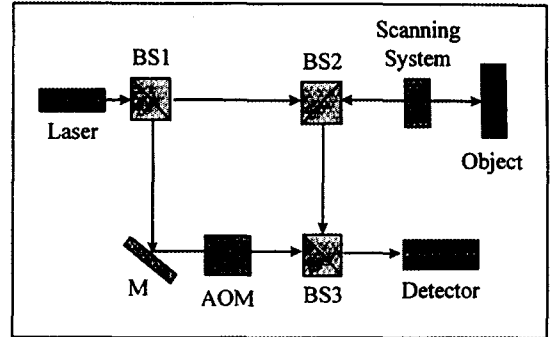


Fig. 2 Mach-Zehnder interferometer modified for scanning measurement from a external target

흐젠더 간섭계(Mach-Zehnder Interferometry)를 변형한 형태이다. 기준 빔 방식은 물체에 의해 산란된 물체 빔과 기준빔을 간섭 시키는 방법으로, 두 개의 산란빔에 의한 간섭 방식인 이중빔 방식에 비해 광축 방향으로의 진동, 즉 면외진동 측정에 적당한 방식이다.

간섭계에서 크기 U_0 의 레이저 빔은 BS1에 입사하여 1:1로 광학적으로 분할되어 물체빔과 기준빔이 되는데, 이 두개의 빔은 BS2와 광음향소자를 통과하는 각각의 경로를 따라 진행하여 BS3에서 교차하게 된다. 이때의 기준빔 Ψ_r 과 물체빔 Ψ_o 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Psi_r = \frac{U_0}{2} e^{i\Phi_0} e^{-i2\pi(f_i - f_B)t} \quad (5)$$

$$\Psi_o = \frac{U_0}{2} e^{i\Phi_0} e^{-i2\pi(f_i + f_D)t}$$

f_B 는 방향편별을 위한 하향천이 된 광음향소자의 주파수이고 f_D 는 도플러 효과에 의한 도플러 주파수이다. 도플러 효과란 움직이는 물체에 입사한 빛이 주파수 천이 되어 입사주파수 f_i 와 산란주파수 f_s 사이에 주파수차가 발생하는 것으로, 식(6)에 표현된 것처럼 속도에 직접적인 비례관계에 있다.

$$f_s = f_i + \frac{\vec{V} \cdot (\vec{s} - \vec{i})}{\lambda_i} \quad (6)$$

$$f_D = \frac{\vec{V} \cdot (\vec{s} - \vec{i})}{\lambda_i}$$

여기서 \vec{i} 와 \vec{s} 는 입사빔과 산란빔의 진행방향으로의 단위벡터를 나타내며, \vec{V} 는 물체의 속도벡터, λ_i 는 빔의 파장을 나타낸다. 제시된 기준빔 간섭계는 입사빔과 산란

빔, 물체의 진동방향이 일치하므로 도플러 주파수는

$$f_D = \frac{2V}{\lambda_i} \quad (7)$$

가 된다.

이와 같이 광음향소자에 의해 하향천이 된 기준빔과 물체 진동에 의해 도플러 주파수 천이된 물체빔이 BS3에서 간섭을 일으키면, 간섭신호는 식 (4)의 간섭식에 의해

$$\begin{aligned} I &= |\psi|^2 = |\psi_r + \psi_o|^2 \\ &= \frac{I_o}{2} [1 + \cos(2\pi(f_B + f_D)t)] \\ &= \frac{I_o}{2} \left[1 + \cos \left(2\pi \left(f_B + \frac{2V}{\lambda_i} \right) t \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

로 표현되는데, 물체의 진동으로 생성되는 신호가 f_B 에 의해 변조되어 식 $f_B + 2V/\lambda_i$ 의 주파수를 가지게 됨을 알 수 있다.

이 신호는 광검출기에 의해 전기신호로 바뀌고, 신호처리부에서 복조되어, 속도 V 는 다음과 같이 표현된다.

$$V = \frac{f_{\text{demodulated}} \cdot \lambda_i}{2} \quad (9)$$

여기서 $f_{\text{demodulated}}$ 는 복조된 주파수로 양이나 음의 값을 가지게 되는데, 이에 의해 물체의 진동방향을 판별할 수 있게 된다. 양의 값은 물체가 간섭계로 진행하는 경우이며, 음의 값은 반대쪽으로 멀어져 가는 경우이다.

본 연구에서 사용된 광음향소자는 40MHz의 주파수를 가지는 브렉셀로, 헬륨-네온(He-Ne) 레이저를 광원으로 사용하였을 때 최대 12.6m/s의 운동 방향 판별이 가능하다. 이러한 진동 측정기의 속도는 스캐닝에 의해 시간에 따라 변하는 좌표상에서 검출되는 신호이므로, 고정된 좌표에 대한 신호로의 변환이 필요하다. 이러한 변환은 시스템의 운동방정식으로부터 구해지는 속도 표현식에 스캐닝 관계식을 대입하고 시간에 관하여 정리한 후, 이를 진동 측정기의 시간속도와 비교 분석함으로써 가능하다.

3. 스캐닝 시스템

진동모드와 지점에서의 응답특성을 같은 일련의 단일 센서로 측정하기 위해서는 스캐닝 시스템이 필요하다.

그림 3은 본 연구에서 사용된 스캐닝 방식을 나타낸 것

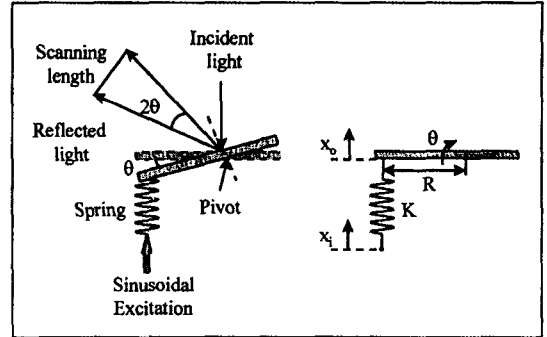


Fig. 3 Oscillating scanner with pivoted mirror

이다. 상용스캐너의 베어링 지지부에선 피봇으로 미러가 지지 됨으로써 댐핑계수를 낮추도록 한다. 피봇된 미러가 정현가진에 의해 θ 만큼 회전하면, 미러 정반사에 의해 2θ 만큼 회전하며 스캐닝을 이루게 된다. 스프링의 입력부와 출력부의 변위는 각각 x_o 와 x_i 로 나타내면 시스템의 운동 방정식은 다음과 같다

$$I\ddot{\theta} + KR^2\dot{\theta} = KRx_i \quad (10)$$

여기서 I 는 미러부의 관성모멘트로 $260.3\text{g}\cdot\text{mm}^2$ 이며, 스프링상수는 $0.7\text{N}/\text{mm}$, R 은 피봇암의 길이로 21.5mm 이다. 시스템을 가볍고 작게 하기 위해 $\phi 12.7\text{mm}$, 두께 1.5mm 의 미러와 알루미늄 마운트를 사용하였으며, 이때 시스템의 고유진동수는

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{KR^2}{I}} \quad (11)$$

에 의해 177.43Hz 가 된다. 그림4는 스캐닝 미러부에서의 광경로를 나타낸다.

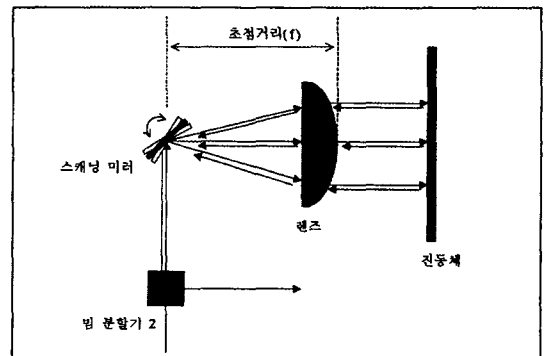


Fig. 4 Optical path in the scanning part

빔분할기2를 나온 빛에 스캐닝 미러를 거쳐 평면-볼록 렌즈(Plano-Convex Lens)를 지나 진동체에 입사 된다. 이때 스캐닝 미러와 렌즈의 거리를 초점거리로 맞추어 놓으면 진동체에서 산란된 빛이 다시 렌즈를 거쳐 처음의 광경로를 거치며 빔분할기 2에 입사되게 된다. 따라서 측정하고자 하는 진동체의 일련의 지점에서 스테닝이 일어나고 미러의 구동이 정현가진으로 정밀구동 되어지면 간섭계로부터 나오는 시간에 대한 속도 분포를 분석함으로써 진동체 각각의 일련의 스캐닝점에 대한 공간 속도분포를 얻을 수 있게 된다.

스캐닝 미러 가진은 자기변형 소자인 터페놀 액츄에이터로 구현한다. 터페놀의 주파수 특성과 전력을 위치 제어용으로 많이 사용되고 있는 압전소자와 비교해 보면, 압전소자는 1000V의 입력 전압에서 수백 Hz의 bandwidth를 갖는 반면, 터페놀은 1.4A RMS의 저전력에서 6KHz의 높은 bandwidth를 갖는다. 저전력은 갈바노스캐너(Galvanometric scanner)의 $\pm 15V$, 3A보다 낮아⁽⁹⁾ 전력면에서 매우 경제적이며, 좋은 주파수 특성에 의해 높은 스캐닝 주파수를 얻을 수 있다. 변위는 압전소자의 10여배에 달하는 1000ppm으로, 히스테리시스가 아주 작은 선형영역에서 공진 가진하여 위치 제어 없이 원하는 변위를 얻을 수 있다.

자기변형소자의 변형률S는 기계적 예압에 의한 응력T와 자계H에 의해 식 (12)로 표현된다⁽¹¹⁾.

$$S = s^H T + dH \quad (12)$$

여기서 s^H 는 자기변형소자의 탄성계수의 역수, d는 자계와 변형률간의 비를 나타낸다.

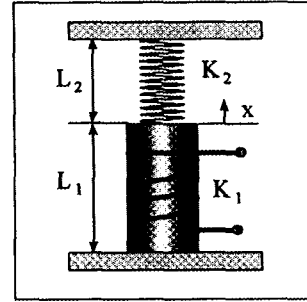


Fig. 5 Modeling of the Terfenol-D actuator

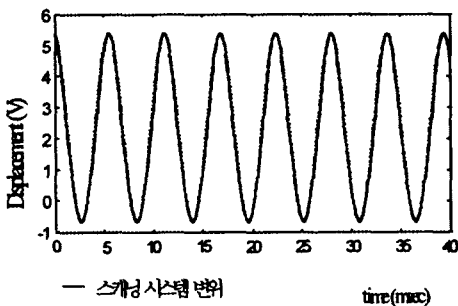
자기변형소자를 K_1 의 등가스프링으로 간주하고, 예압용으로 K_2 의 스프링을 사용하면, 미러가진용 터페놀 액츄에이터는 그림5로 등가 모델링 되어진다.

이때 변위 x는 식(13)과 같고 K_2 가 K_1 에 비해 상당히 작으므로, 외부자계에 의해 선형적으로 변하는 관계식 (14)를 갖는다.

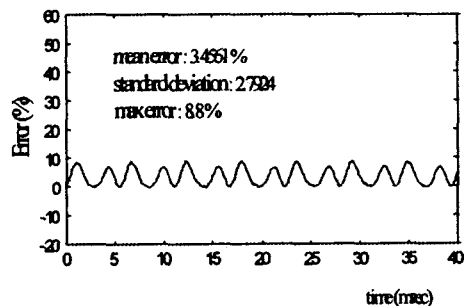
$$x = \frac{L_1 dH}{1 + K_2 / K_1} \quad (13)$$

$$\cong L_1 dH \quad (14)$$

그림6는 $\pm 1.4A$ RMS의 입력 전류로 $\pm 25\mu m$ (1000 ppm)의 변위를 낼 수 있는 터페놀 액츄에이터에 의해 공진주파수(177.43Hz)에서 가진된 스캐닝 시스템의 실제 변위(a)와 정현변위와의 오차(b)를 나타낸 것이다. 측정은 0.4mm/V의 분해능을 가지는 와전류형 센서(Eddy current sensor)에 의해 이루어졌다. 터페놀 액츄에이터의 선형영역인 $\pm 4\mu m$ 변위만을 갖도록 하였다. 이때 공진



(a) absolute displacement of the scanning mirror



(b) relative scanning mirror motion with respect to sinusoidal excitation

Fig. 6 Error due to the scanning mirror motion

에 의해 증폭된 변위는 $\pm 1.2\text{mm}$ 로 300여배의 증폭효과를 얻었다. 21.5mm 의 피봇암에 의해 $2\theta = 0.22(\pm 6.40^\circ)$ 의 스캐닝각을 얻었으며, 위치오차는 평균 3.4261% 로 스캐닝각에 대해 0.438° 의 에러에 해당한다. 이 위치오차는 스캐닝 시스템의 피봇정렬등의 제작 오차에 의한 것으로 고려되며, 정확한 수직축 정렬에 의해 줄어들 수 있을 것으로 기대된다.

4. 진동체의 이론적 해석

앞의 간섭계와 스캐닝시스템에 의해 얻어진 진동체에 대한 속도는 시간에 대한 속도만을 얻게 된다. 따라서 정현 스캐닝에 의해 측정진동체의 일련의 점에서의 속도분포를 얻기 위해 시간에 대한 속도분포를 시간과 공간에 대한 속도분포로 나타낼 필요가 있다. 이를 위해 다음의 진동체에 대한 이론적 해석이 필요하다.

정현가진 f 에 대한 N 차 선형 시스템의 운동방정식은 질량 m , 감쇠 c , 강성행렬 k 에 의해 식 (15)로 표현된다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = f \quad (15)$$

이 방정식의 해는 모드중첩원리(mode superposition method)에 의해⁽⁸⁾

$$u(t) = \sum_{r=1}^N \phi_r c_r \cos(\omega t - \alpha_r) \quad (16)$$

로 구해진다. 여기서 ϕ_r 은 진동모드, c_r 은 상수, ω 는 가진주파수, α_r 은 가진입력과 응답사이의 위상차이를 나타낸다. 속도를 얻기 위하여 식 (16)을 미분하고, 전개인수인 $-c_r \omega \sin \alpha_r$ 와 $c_r \omega \cos \alpha_r$ 을 각각 C_{rR} 과 C_{rI} 로 표현하면 속도는 식 (17)과 같이 표현된다.

$$v(t) = \sum_{r=1}^N \phi_r C_{rR} \sin \omega t + \sum_{r=1}^N \phi_r C_{rI} \cos \omega t \quad (17)$$

진동모드 ϕ_r 은 공간상에서 물체의 진동형상을 나타내므로 이를 이용해 식 (17)을 시간과 공간의 속도식으로 나타낼 수 있다.

$$v(x, t) = g(x) + \varphi(x) \sin \omega t + \psi(x) \cos \omega t \quad (18)$$

$g(x)$ 는 일반적인 진동인 강체 모드를 포함하기 위한 항

이며, $\varphi(x)$ 와 $\psi(x)$ 는 식 (17)의 $\sum_{r=1}^N \phi_r C_{rR}$, $\sum_{r=1}^N \phi_r C_{rI}$ 를 정리한 함수이다. 구조체가 선형 시스템이고 공진 ω 에서 가진되는 경우, $\varphi(x)$ 와 $\psi(x)$ 는 그 주파수에 해당하는 모드를 나타내게 된다.

시간과 공간의 속도식 (18)로부터 진동측정기의 시간 속도를 얻기 위해, 시간과 공간의 관계식인 스캐닝 식이 필요하다. 그림7은 정현 스캐닝 방식의 진동체에서의 스캐닝 경로를 나타내고 있다.

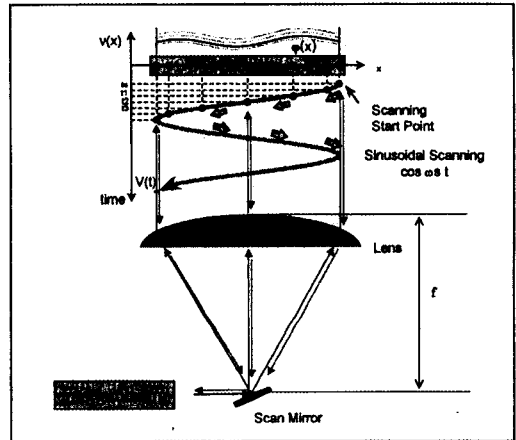


Fig.7 Coordinate of scanning path on an object surface when the scanning mirror is excited by sinusoidal function.

진동체의 속도는 그림7과 같이 스캐닝미러의 스캐닝에 의해 진동체에 입사되는 빛의 위치가 시간에 따라 바뀌게 된다. 정현스캐닝에 의해 그 진폭이 일정하다면 시간에 대한 입사빛의 위치를 예측할 수 있고 이로 인해 시간에 따라 얻어지는 속도분포를 시간과 공간에 대한 속도분포로 바꿀 수 있게 된다.

본 논문에 사용된 스캐닝 방식은 주파수 영역에서의 분석이 용이한 정현스캐닝 방식이다. 스캐닝 주파수가 ω , 이고, 진폭이 1이면 스캐닝 관계식은

$$x = \cos \omega_s t \quad (19)$$

로 표현된다. 진동체의 측정영역을 -1과 1로 하여 스캐닝 좌표와 진동체 좌표를 일치시키고, 이를 속도식 (18)에 대입하면 공진 ω 에서 가진되는 진동 측정기의 출력속도 $V(t)$ 를 얻게 된다.

$$V(t) = v(\cos \omega_s t, t) = g(\cos \omega_s t) + \varphi(\cos \omega_s t) \sin \omega_s t + \psi(\cos \omega_s t) \cos \omega_s t \quad (20)$$

출력 신호의 주파수 성분을 알기 위해 g, φ, ψ 를 코사인 푸리에 시리즈로 전개하고

$$\begin{aligned}
 g(\cos\omega_s t) &= c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos n\omega_s t \\
 \varphi(\cos\omega_s t) &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_s t \\
 \psi(\cos\omega_s t) &= b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos n\omega_s t
 \end{aligned} \quad (21)$$

이를 식 (20)에 대입, 정리하면 속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V(t) &= \sum_{n=0}^N (c_n + a_n \sin\omega_s t + b_n \cos\omega_s t) \cos n\omega_s t \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{n=0}^N \left[c_n e^{jn\omega_s t} + c_n^* e^{-jn\omega_s t} + \frac{1}{2} (b_n - ja_n) e^{j(\omega_r \pm n\omega_s)t} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} (b_n + ja_n) e^{-j(\omega_r \pm n\omega_s)t} \right]
 \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 *은 공액복소수, c_n, a_n, b_n 은 푸리에 시리즈의 인수이다. 식 (20)으로 표현되는 진동출력기의 신호를 스펙트럼 분석하여 특정 주파수에서의 값을 읽으면, 측정된 속도를 수학적으로 기술할 수 있게 된다.

그림8은 스펙트럼으로부터 푸리에 시리즈의 인수 찾는 방법을 나타낸 것이다. 주파수 0에서의 값은 c_0 에 해당되고, ω_s 의 실수부와 허수부의 값은 각각 b_0, a_0 에 해당된다. $n\omega_s$ 의 값으로부터 c_n 을, $\omega_r \pm n\omega_s$ 의 값으로부터 b_n, a_n 을 알 수 있게 된다.

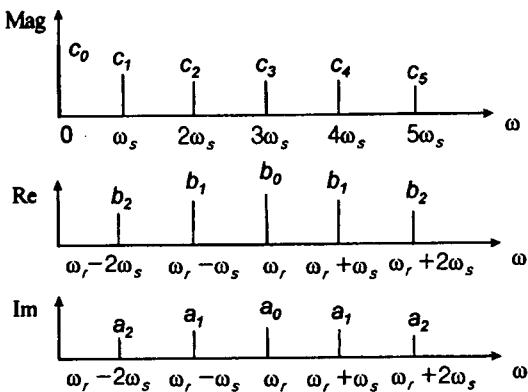


Fig. 8 Frequency spectrum of the Laser Doppler Vibrometer(LDV) output

5. 실험

3절에서 논의된 스캐닝 시스템과 광학간섭계를 이용하여 진동측정실험을 하기 전에 광학간섭계의 calibration을 위하여 광학간섭계의 한 지점의 진동측정실험을 수행하였다. 광원으로는 5mW의 헬륨-네온(He-Ne) 레이저를 사용하였고, 1/2파장판(HWP)과 1/4파장판(QWP)을 추가하고 PBS(Polarizing BS)를 사용하여 편광방향과 광선정렬을 이룸으로써 간섭효과를 증대하였다. 광검출기(Detector)는 광전효과에 의해 입사빔의 에너지를 전류로 변환시키는 장치로 633nm의 광원에 대하여 0.28A/w이며 400MHz의 cutoff 주파수를 가지고 있다. 진동체의 정현진동은 B&K4809가진기에 의해 15KHz로 주어졌다.

간섭계의 구성에서 가장 중요한 것은 광 경로를 정렬하여 간섭효과를 최대도 증대 시키는 것이다 간섭은 교차하는 두 빔의 광 경로와 편광방향이 일치할 때 최대값을 가지므로 광 경로 및 편광방향을 위한 정렬이 필요하다. 또한 외부 물체와의 움직임만을 재측하는 것이므로 내부 경로차를 없애 주어야 한다. 그림9는 간섭계의 구성 및 편광정렬을 보여준다. 직선편광으로 되어 있는 레이저를 1/2 파장판(HWP)을 사용하여 45도 회전시킨다. 이와 같이 45도 편광 회전된 빔은 PBS1에서 P 편광성분과 S 편광성분으로 1:1 분할된다. 물체빔 경로의 P파는 PBS2를 통과 진행하여 QWP로 입사하고 원형 편광 상태로 물체에 입사하게 된다. 산란된 빔이 다시 1/4 파장판을 거쳐 S 편광상태로 되므로 기준빔 경로의 S파와 BS에서 간섭을 일으키게 된다. 원형편광은 빛이 진행하면서 회전하는 형태이므로 편광기의 어떠한 방향에 대해서도 일정한 빛의 강도를 갖는 특성이 있어서, 편광기를 회전

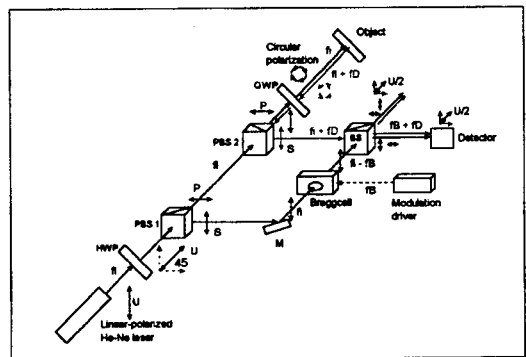


Fig. 9 Schematic representation of the interferometer and polarization orientations

시키면서 빛의 강도가 일정한지를 관찰하면 원형편광을 확인할 수 있다.

본 실험은 한 지점의 진동측정 실험으로 시간에 대한 속도의 정보만을 준다. 즉 스캐닝 주파수 $w_s=0$ 이고 정현 가진(w)에 의해 $c_n=0$ 이므로, 속도는 식(22)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$V = \left(\sum_{n=0}^N a_n \right) \sin \omega t + \left(\sum_{n=0}^N b_n \right) \cos \omega t$$

$$= V_0 \cos(\omega t + \alpha_0) \quad (23)$$

여기서 $\sum_{n=0}^N a_n$ 과 $\sum_{n=0}^N b_n$ 이 각각 $-V_0 \sin \alpha_0$ 과 $V_0 \cos \alpha_0$ 로 정리되었다. 이때의 도플러 주파수는 정현적인 속도변화에 의해

$$f_D = \frac{2V}{\lambda} = \frac{2V_0 \cos(30000\pi + \alpha_0)}{632.8 \times 10^{-9}} \quad (24)$$

로 정현적으로 변화하며 f_b 에 의해 변조된다.

그림10은 B&K4809가진기를 15KHz로 가진하였을 때 실험장치의 광검출기로부터 나오는 신호의 주파수 특성과 상용화 되고 있는 Polytec사의 진동측정기 OFV511로 측정된 속도를 나타내고 있다.

그림10 (a)는 광검출기에서 나오는 신호를 오실로스코프(HP54520) 상에서 FFT를 하여 검출신호의 주파수 특성을 표시하므로 진동체에서 도플러 현상에 의해 생성되는 주파수를 확인할 수 있다. 100MHz의 샘플링 주파수로 32768개의 데이터를 받아 FFT가 수행되고 샘플링 신호 끝단에서의 주파수 누수(spectral leakage)를 최소화

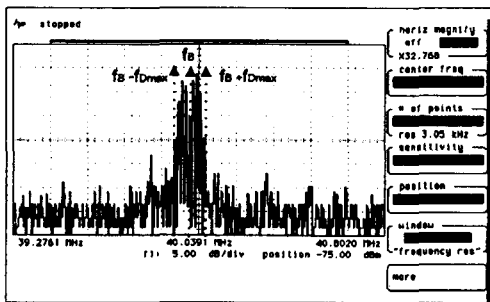
하기 위해 해닝창(Hanning Window)을 필터로 사용하여 40MHz 근처의 주파수성분을 보여주고 있다. 속도가 양의 최대가 되는 경우의 도플러 주파수를 $f_{D_{max}}$ 하고 할 때, 주파수 스펙트럼이 블랙셀에 의해 천이된 f_b (40MHz)를 중심으로 $\pm f_{D_{max}}$ 내에서 분포함을 알 수 있다. 측정된 $f_{D_{max}}$ 는 0.061MHz이므로 진동체의 최대 속도는 도플러 관계식 (7)에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$v_{max} = v_0 = \frac{f_{D_{max}} \cdot \lambda_i}{2} = 0.0193m/s \quad (25)$$

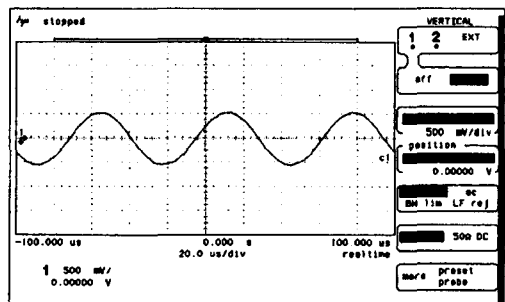
또한 그림 10 (b)는 속도 범위(Velocity Range)를 25mm/s/V로 하여 Polytec사의 진동측정기로 15KHz로 가진 되는 B&K4809 가진기에 의해 진동하는 진동체의 속도를 측정된 것이다. 그림10에 나타나듯이 최대속도는 0.0175mm/s를 나타내고 있다. 따라서 실험 장치의 광학계에 위해 측정된 최대속도와 Polytec사의 진동측정기에 의한 최대속도와 약 10%의 오차가 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 그림10 (a)의 주파수특성 그래프의 수평방향의 눈금단위가 MHz로 데이터를 읽는 오차가 크게 나타날 수 있다. 따라서 이 실험만으로는 실험 광학계를 이용한 정확한 진동체의 속도는 구할 수는 없으나 실험장치에 의한 속도측정이 상용화 되고 있는 진동측정기에 근접하므로 실험장치의 광학계 정렬이 잘 이루어졌음을 알 수 있다.

속도 정보는 식(23)으로부터 $\alpha_0 = 0$ 로 가정하면 다음과 표현할 수 있다.

$$V(t) = 0.0193 \cos(30000\pi t_0) \quad (26)$$



(a)



(b)

Fig. 10 (a)Output spectrum of the photodetector (b) Velocity measurement by using a vibrometer (Polytec OFV511)

6. 결 론

구성된 간섭계로 소형, 경량 미러의 진동을 측정하였고 터페놀 액츄에이터를 이용하여 공진에서 구동되는 스캐닝 시스템을 개발하였다. 스캐닝 시스템은 위치 제어 없이 12.8°의 스캔각에 대해 3.4561%의 평균오차를 가지고 있어, 진동 측정기에 충분한 적용 가능성을 제시하였다. 그러나 간섭계에서 측정된 간섭신호에 노이즈가 많이 섞여, 스캐닝 시스템과의 결합은 이루어지지 않았다. 이는 그림8에 제시된 것과 같이, 주파수 스펙트럼의 값으로부터 속도성분을 구하는 스캐닝시의 진동 측정에 노이즈에 의한 영향은 치명적이기 때문이다. 노이즈는 신호가 약하고, 고주파이기 때문에 생기는 것이므로 신호를 여러 단에 걸쳐 필터링 및 증폭하고 저주파로 낮춰주면 노이즈에 의한 영향을 줄일 수 있다. 향후, 간섭신호상의 노이즈 제거와 신호 증폭 및 복조를 위한 신호처리부를 설계하여 크고 깨끗한 신호를 얻고, 스캐닝 시스템과 결합하여 스캐닝 진동 측정을 이루는 연구를 진행할 예정이다.

개발된 스캐닝 시스템은 고정된 주파수에서 동작하는 것으로, 여러 응용에서 사용되기 위해서는 주파수 가변이 필요하다. MEMS(Microelectromechanical system) 기술과 토션 바(torsion bar)를 이용하면 마이크로 크기에서 수십 도에 이르는 큰 스캔각과 주파수 가변을 가능하게 하는 스캐닝 시스템 개발이 가능하리라 여겨진다⁽¹⁵⁾.

참 고 문 헌

1. Daniel J., Inman, *Engineering Vibration*, Prentice Hall
2. 임태봉, 서호성, 3차원 측정 및 레이저 응용 측정, 한국표준과학연구원, 1992.
3. J.H., Kim, "Vibration Analysis using ESPI," Master thesis, Chosun. Univ., 1995.
4. Guenther, *Modern Optics*, John Wiley & Sons, Inc., 1990.
5. Durst, F., Lehmann, B., Tropea, C., "Laser Doppler System for Rapid Scanning of Flow Fields," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 65, No. 5, pp. 1974-1976, May 1992.
6. Sriram, P., Hanagud, S., Craig, J.I., and Komerath, N.M., "Scanning Laser Doppler Technique for Velocity Profile Sensing on a Moving Surface," *Appl., Opt.*, Vol. 29, No. 16, pp. 2409-2417, 1990.
7. Makoto Okuda, Naomasa Wakita, Kanji Ohya, "A Laser Scanner Using Stacked Piezoelectirc Ceramic Actuator," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 25 pp. 223-225, 1986.
8. Roy R. Craig, Jr., *Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Inc., 1981.
9. Gerald F., Marshall, *Optical Scanning*, Marcel Dekker, Inc.
10. D.J., Ewins, *Modal Testing and Theory*, John Wiley & Sons Inc., 1984.
11. H.K., Jeong, K.H., Park, "Active Vibration Suppressing using a Magnetostrictive Material," *Asia-Pacific Vibration Conference*, Nov, pp. 1182-1193, 1997.
12. J.H., Lee, "A study on a Laser Doppler Vibrometer using a Resonant Scanner driven by a Terfenol Actuator," Master Thesis, KJIST, 1997.
13. WooJoo, *Laser Seminar*, Polytec, 1996.
14. Francis S. Tse, *Mechanical Vibrations - theory and applications*.
15. Jack W. Judy, "Magnetically Actuated, Addressable Microstructures," *Journal of Microelectromechanical systems*, Vol. 6, No. 3, Sep., 1997.