

미소 진폭 기계진동의 Synthetic-heterodyne 간섭측정에 대한 연구

Synthetic-heterodyne interferometry for measuring extremely small amplitude of mechanical vibrations

강성구*·라종필**·윤희선*·박기환***

Seong-Gu Kang, Jong-Pil La, Hee-Sun Yoon and Kyi-Hwan Park

Key Words : Synthetic heterodyne interference(신세탁 헤테로다인 간섭), Homodyne interferometer(호모다인 간섭계), High pass filter(고역통과필터), Frequency modulation(주파수 변조), One-shot F/V convertor(원샷 주파수-전압 변환기).

ABSTRACT

On the homodyne interferometers, high pass filter(HPF) is usually used to remove the electrical noise in the interferent signal. Heterodyne interferometer has modulating frequency is shifted in the frequency region where the electrical noise effect is minimized by HPF effect. However, on the homodyne interferometer, the interferent DC-component of homodyne interferometer is unfortunately eliminated by using a HPF because its shifted frequency does not exist. Moreover, this effect is more serious the vibration amplitude is smaller. So, when unstable interferent signals via HPF are demodulated, a velocity is distorted.

In this work, the mathematical explanation for the distortion of the homodyne interferent signal using the HPF is given. New synthetic heterodyne LDV based on the homodyne interferometer by exciting the reference mirror is proposed for the cancellation of the distortion. The optimum excitation condition of the mirror to compensate the distortion is discussed. The numerical simulation using the commercial MATLAB code is provided to show the effect of the proposed synthetic heterodyne LDV. The experimental results are also given and the effect of the proposed LDV is discussed.

1. 서 론

최근 산업현장에서 간섭계를 이용하여 거리, 진동 그리고 표면형상 측정 등에 다양하게 사용되고 있다. 거리 및 진동 측정계에 활용되고 있는 간섭계에는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 호모다인 방식과 헤테로다인 방식이 있다. 호모다인 간섭계는 단일 주파수 광원을 이용하여 측정광과 기준광의 간섭을 이용하여 거리 및 속도 정보를 얻어낸다.

하지만 호모다인 간섭계의 특성상 영주파수를 가지고 있어 속도 정보를 얻어 낼 때, 양과 음의 속도를 구별할 수 없는 단점을 가지고 있다.⁽¹⁾ 간섭신호는 수광부의 특성상 DC 오프셋이 존재하는데, DC 오프셋을 제거하기 위해서 일반적으로 고역 통과 필터(High pass filter; HPF)를 이용한다. HPF를 사용하게 되면 정지(제로 주파수)해 있는 물체에 대해서는 필터의 대역폭 밖에 존재하여 거리 정보를 얻을 수 없게 되며, DC항목을 제거하게 되어 속도 신호에 왜곡이 발생하게 된다. 이 대안으로 헤테로다인 간섭계가 사용된다. 헤테로다인 기법은 두 주파수를 가진 광원을 사용하여 두 주파수의 위상차이로 거리 및 속도 정보를 얻어낸다. 헤테로다인 간섭 신호는 기본적으로 수백KHz에서 수십MHz의 주파수를 가지고 있어 속도 방향의 양과 음을 구별 할 수 있다. 또한 HPF를 사용하여도 필터의 대역폭 내에 존재하기 때문에, 측정 정보를 얻을 수 있다. 하지만 헤테로다인

* 광주과학기술원 기전공학과
E-mail : livegod@gist.ac.kr
Tel : (062) 970-2411, Fax : (062) 970-2384

** 광주삼성전자 Compressor R&D

*** 광주과학기술원 기전공학과 정교수

기법은 광학적인 주파수 변조 방법이 흔히 사용되는데, 음향광학장치나 Zeeman 효과를 사용해야하기 때문에 시스템이 복잡해진다. 따라서 이 대안으로 광학적인 방법이 아닌 전기적 신호처리 기법이나 기계적 변조 방법으로 헤테로다인을 구현하는 Synthetic heterodyne 기법이 사용되었다. 1982년 Jackson의 램프 변조를 이용한 Pseudo-heterodyne 복조⁽²⁾를 시작으로 같은 해에 James의 파이버 간섭계와 광전자증배관을 활용한 Synthetic-heterodyne 간섭 복조기법⁽³⁾, Dandridge에 의한 Active homodyne 기법⁽⁴⁾이 소개되었다. 최근에는 PZT의 파형을 이용하여 Flyback 문제를 해결하기 위한 Synthetic heterodyne 복조기법⁽⁵⁾, digital기법을 활용한 Synthetic heterodyne 간섭 복조기법⁽⁶⁾, 속도정보의 음과 양을 구별하기 위하여 디지털 헤테로다인 기법⁽¹⁾ 등이 연구되었다.

본 논문에서는 호모다인 간섭계를 가진 레이저 도플러 바이브로미터(Laser Doppler vibrometer; LDV)에 Synthetic heterodyne 기법을 적용하였다. 고주파 저진폭 진동을 측정하는 간섭신호의 DC offset을 제거하기 위하여 HPF를 활용하였다. 하지만 HPF를 사용할 경우 간섭신호의 정보가 손실되어 속도 신호의 왜곡과 발산이 초래된다. 간섭신호의 정보가 손실되지 않도록 reference mirror를 가진함으로써 발생하는 synthetic heterodyne 효과를 활용하여 왜곡된 속도신호를 복원하기로 한다. 이를 위해서 이론과 시뮬레이션을 통해서 속도신호 왜곡의 원인을 밝혀내고, synthetic heterodyne 효과에 대해 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 광간섭 신호

호모다인 간섭계에서의 기준 전자기 파동과 측정된 전자기 파동은 각각 식(1)과 식(2)로 표현할 수 있다.

$$E_r = \widehat{E}_r e^{i(\omega_1 t + kx_1 + \varphi_0)} \quad (1)$$

$$E_m = \widehat{E}_m e^{i(\omega_2 t + kx_2 + \varphi_0)} \quad (2)$$

기준 전자기 파동과 측정된 전자기 파동의 간섭 대해 식(1)과 식(2)를 전개하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi &= |E_r + E_m|^2 = (E_r + E_m)(E_r + E_m)^* \quad (3) \\ &= \widehat{E}_1^2 + \widehat{E}_2^2 + 2\widehat{E}_1\widehat{E}_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t - k(x_1 - x_2)) \\ &= \widehat{E}_1^2 + \widehat{E}_2^2 + 2\widehat{E}_1\widehat{E}_2 \cos\Delta\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x \end{aligned}$$

여기에서 λ 는 빛의 파장(wavelength), Δx 는 진동체의 변위를 의미한다.

$$\phi = A + B\cos(\Delta\omega t + \varphi(t)) \quad (4)$$

$$\Delta x = \varphi(t) = \widehat{\varphi} \sin(\omega t)$$

$$\widehat{\varphi} = k\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} a$$

여기에서 $\phi = |E_r + E_m|^2$, $A = E_1^2 + E_2^2$, $B = 2E_1E_2$, $\Delta\omega = 0$ 으로 정한다. $\widehat{\varphi}$ 는 진동체의 진폭을 의미한다. 호모다인 간섭계에서 얻어낸 두 신호는 아래 식(5)와 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{m,i} = A + B\cos\{\varphi(t)\} \quad (5)$$

$$\phi_{m,q} = A + B\sin\{\varphi(t)\} \quad (6)$$

하지만 위 식(5)와 식(6)을 Fourier-Bessel series를 이용하여 다시 전개할 경우, 식(7)과 식(8)로 전개할 수 있다.⁽⁷⁾

$$\phi_{m,i} = A + B \left[J_0(\widehat{\varphi}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\widehat{\varphi}) \cos(2n\omega t) \right] \quad (7)$$

$$\phi_{m,q} = A + B \left[2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\widehat{\varphi}) \sin\{(2n-1)\omega t\} \right] \quad (8)$$

수광부의 특성상 간섭신호 외에 레퍼런스 빔과 측정 빔으로 인하여 발생하는 DC offset A가 존재한다. 식(5)와 식(6)을 series로 전개할 경우 식(7)에서와 같이 $B J_0(\widehat{\varphi})$ 와 같은 DC 성분이 나타나게 된다. 이는 실제 빛의 파장보다 작은 크기로 진동하는 물체를 측정할 때, fig. 1과 같이 관찰할 수 있게 된다.

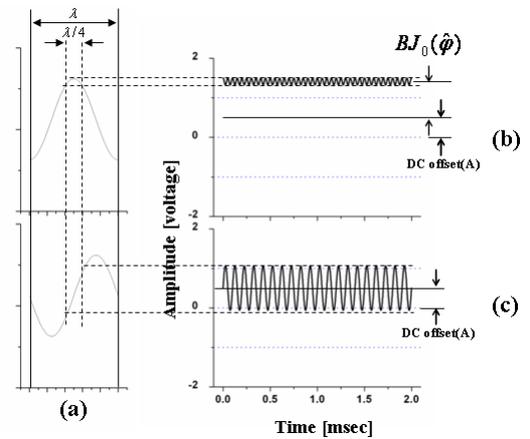


Fig. 1 Interference signal with DC component (Exciting frequency: 10KHz, Vibration amplitude : $\lambda/4$)

식(7)과 식(8)의 신호에서 DC offset인 A를 제거하기 위

하여 HPF를 이용하면, 다음의 식(9)와 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{HPF,i} = 2B \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\widehat{\varphi}) \cos(2nut) \quad (9)$$

$$\phi_{HPF,q} = 2B \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\widehat{\varphi}) \sin\{(2n-1)ut\} \quad (10)$$

식(9)에서 볼 수 있듯이, HPF를 사용함으로써 불필요한 DC offset(A)을 제거할 수 있었지만, 원래 간섭 신호의 일부를 이루고 있는 DC 성분인 $BJ_0(\widehat{\varphi})$ 이 제거된다. 따라서, HPF에 통과되어 DC성분이 제거된 간섭신호는 식(11)과 식(12)로 표현할 수 있다.

$$\phi_{HPF,i} = B \cos\{\varphi(t)\} - D, \quad D = BJ_0(\widehat{\varphi}) \quad (11)$$

$$\phi_{HPF,q} = B \sin\{\varphi(t)\} \quad (12)$$

식(11)과 식(12)를 이용하여 속도 성분을 얻어내게 된다면, 양의 속도만을 얻어낼 수 있게 된다. 음의 속도를 얻어내기 위해서 음의 주파수 영역에 존재하는 속도를 양의 영역으로 천이시키기 위하여 주파수변조 기법을 이용하였다. 식(11)과 식(12)를 주파수 변조 기법⁽¹⁾을 이용하여 $+w_s$ 만큼 천이하게 되면, 식(13)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{s,m} &= B\{\cos(w_s t) \cos \varphi(t) - \sin(w_s t) \sin \varphi(t)\} - D \cos(w_s t) \\ &= B \cos\{w_s t + \varphi(t)\} - D \cos(w_s t) \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)에서 가진 신호 $\varphi(t)$ 에 w_s 의 주파수가 변조된 것을 볼 수 있다. 하지만 주파수 천이된 간섭신호 이외에 $-D \cos(w_s t)$ 이 발생한 것을 볼 수 있다. 이 성분으로 인하여 속도 신호에 왜곡이 발생하게 될 것이다.

2.2 Synthetic heterodyne 효과

HPF에 의한 간섭신호의 측정 정보 손실 문제를 해결하기 위하여 측정주파수 하나를 가진 호모다인 간섭계에 주파수 성분을 더해 주어 헤테로다인 간섭계로 바꿔주어야 한다. 레이저의 특성을 바꾸어 주어 주파수를 가해주는 방식이 아닌 기계적 변조기법이나 전기적 신호처리 기법으로 두 주파수를 만들어 주는 효과를 Synthetic heterodyne(S-H) 효과라 한다⁽²⁾. S-H 효과를 위해서 일정한 주파수를 가진 $\varphi_s(t)$ 만큼 기준 거울에 위상변화를 주게 되면, 호모다인 간섭계는 헤테로다인 간섭계로 변환된다. 이를 식(1)의 레퍼런스 전자기 파동식에 반영하여 측정 신호인 식(2)와 간섭을 시키게 되면 아래의 식(14)와 식(15)로 나타낼 수 있다.

$$\phi'_{m,i} = A + B \cos\{\varphi(t) + \varphi_s(t)\} \quad (14)$$

$$\phi'_{m,q} = A + B \sin\{\varphi(t) + \varphi_s(t)\} \quad (15)$$

HPF에 의해 측정 정보 손실 문제가 발생하는 식(5)를 주파수 변조한 식(14)에 대하여 Fourier-Bessel series로 나타내면, 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

$$\phi'_{m,i} = A + B \begin{bmatrix} \cos \varphi_s(t) J_0(\widehat{\varphi}) \\ + 2 \cos \varphi_s(t) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\widehat{\varphi}) \cos(2nut) \\ - 2 \sin \varphi_s(t) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\widehat{\varphi}) \sin\{(2n-1)ut\} \end{bmatrix} \quad (16)$$

식(16)의 DC 오프셋인 A를 제거하기 위하여 HPF를 통과시키게 되면, 식(17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi'_{HPF,i} = B \begin{bmatrix} \cos\{\varphi_s(t)\} J_0(\widehat{\varphi}) \\ + 2 \cos\{\varphi_s(t)\} \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\widehat{\varphi}) \cos(2nut) \\ - 2 \sin\{\varphi_s(t)\} \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\widehat{\varphi}) \sin\{(2n-1)ut\} \end{bmatrix} \quad (17)$$

식(16)은 HPF의 컷오프가 $\varphi_s(t)$ 의 주파수보다 낮다면 HPF를 통과하여도 식(17)과 같이 DC offset A만 제거될 뿐, 측정 정보인 $BJ_0(\widehat{\varphi})$ 는 $\cos \varphi_s(t)$ 의 주파수 성분으로 인하여 제거되지 않는다. 따라서 $\varphi_s(t)$ 만큼 위상 변화를 시킨 간섭신호는 HPF를 통과한 후에 식(19)와 식(20)으로 표현된다.

$$\phi'_{HPF,i} = B \cos\{\varphi(t) + \varphi_s(t)\} \quad (19)$$

$$\phi'_{HPF,q} = B \sin\{\varphi(t) + \varphi_s(t)\} \quad (20)$$

이렇게 DC항목($BJ_0(\widehat{\varphi})$)이 제거되지 않은 간섭신호를 이용하여 w_s 만큼 주파수 변조를 시킨다면, 식(21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi'_{s,m} = B \begin{bmatrix} \cos(w_s t) \cos\{\varphi(t) + \varphi_s(t)\} \\ - \sin(w_s t) \sin\{\varphi(t) + \varphi_s(t)\} \\ = B \cos\{w_s t + \varphi(t) + \varphi_s(t)\} \end{bmatrix} \quad (21)$$

식(21)에서는 $frequency(\varphi_s(t)) \ll frequency(\varphi(t))$ 일 때, $\varphi_s(t)$ 인하여 발생하는 속도 왜곡은 아주 작아 무시할 수 있다. 따라서 DC항목이 제거되지 않아 정보 손실이 발생하지 않음으로써 속도 신호에 심한 왜곡이 발생하지 않을 것이다. 다음 장에서는 신호의 왜곡과 $\varphi_s(t)$ 로 S-H effect를 주어 신호의 왜곡이 줄어드는 현상에 대하여 시뮬레이션하여 비교하기로 한다.

3. 시뮬레이션

앞장에서 이론적으로 언급하였던 S-H 효과의 시뮬레이션을 상용 수치해석 프로그램인 Mathworks Matlab의 simulink를 이용하여 수행하였다. 아래 Fig. 2는 시뮬레이션을 수행한 LDV의 속도처리회로⁽¹⁾를 나타낸다.

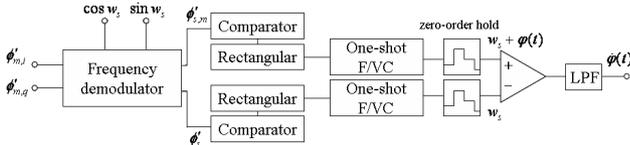


Fig. 2 The velocity demodulation circuit

Fig. 3은 초기 위상이 0이라 가정하고 백색 노이즈 크기를 DC항목이 존재하는 간섭신호의 진폭과 비슷하게 놓았을 때에 S-H 효과를 가했을 때와 그렇지 않았을 때의 간섭신호 및 각각에 대한 Lissajous circle을 보여준다. Fig.3(c)를 보게 되면, 진동폭이 $\lambda/4$ 내에 있게 되어 Lissajous circle의 일부만 나오는 것을 볼 수 있다. Fig. 3(a), (b)에서의 간섭신호가 $\varphi_s(t)$ 로 인하여 위상이 변하게 되어 Fig. 3(d), (e)에서 영점을 교차하는 큰 간섭신호로 변하게 되어 DC항목에 주파수가 실려 DC항목이 제거되지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig.3(f)는 S-H 효과로 인하여 Lissajous circle이 복원된 결과이다.

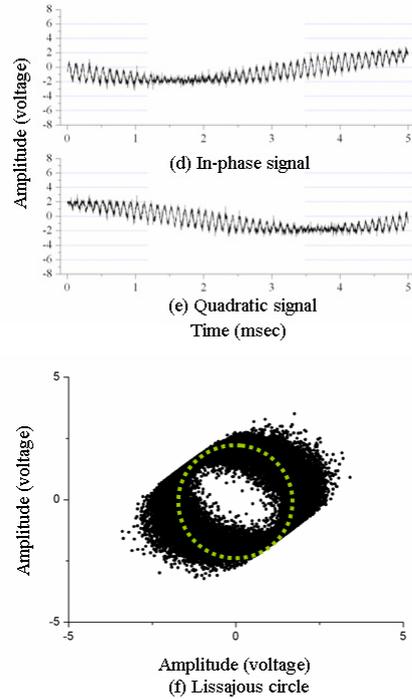
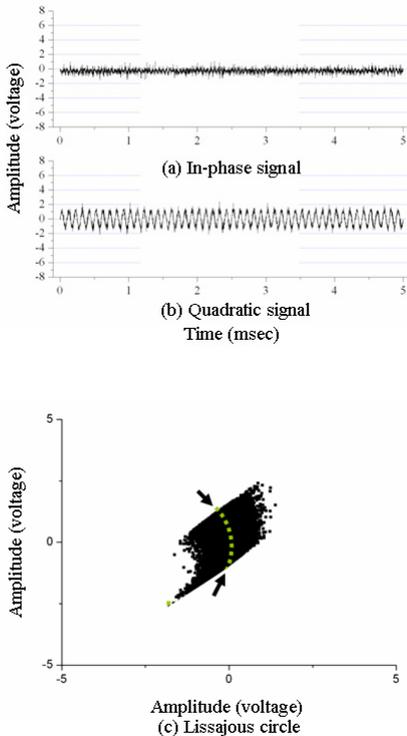


Fig. 3 Interference signals and Lissajous circles (vibration condition: 10kHz, amplitude: 30nm)

Fig. 4는 주파수변조된 간섭신호를 보여준다. Fig.4(a)는 S-H 효과가 가해지기 전의 주파수변조된 간섭신호이며, Fig.4(b)는 S-H 효과를 가해준 후의 주파수변조된 간섭신호를 보여준다.

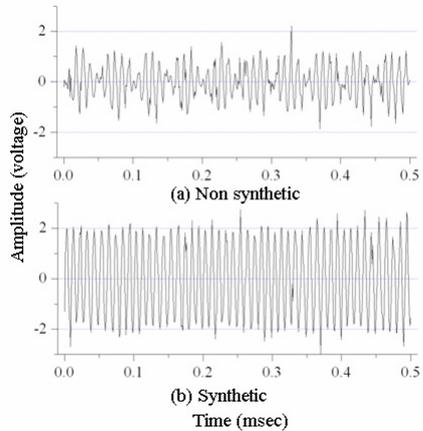


Fig. 4 Frequency shifted interference signals

DC항목이 제거된 간섭신호의 주파수변조 신호는 주기적으로 진폭이 매우 작아지게 된다. 이 때 노이즈 성분이 두드러지게 나타나게 된다. 이러한 노이즈 성분은 속도 복조 회로 내의 비교기에서 디지털화⁽¹⁾되어 속도 신호에 반영이 되게 되고 정상적인 속도 신호를 얻을 수 없게 된다. 이를 해결하기 위하여 S-H 효과를 더해준 간섭신호를 주파수변조한 결

과 fig. 4(b)와 같이 보여지게 된다. fig. 4(b)에서는 fig. 4(a)와 같이 간섭신호의 진폭이 주기적으로 현격히 줄어들어 드는 현상이 없이 일정한 진폭의 크기를 계속 유지하는 것을 보여준다. 따라서 속도신호의 왜곡이 현격히 줄어들 것이다.

Fig. 5는 S-H 효과가 존재할 때와 존재하지 않을 때의 속도신호를 시뮬레이션 한 결과이다.

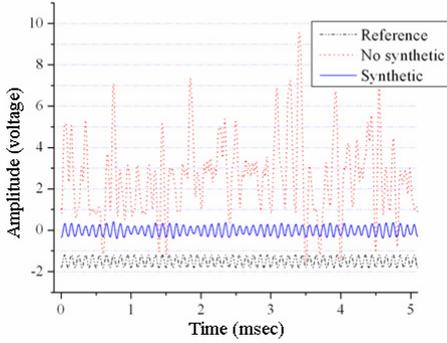


Fig. 5 Velocity signals for a small amplitude vibration (<150nm)

Fig.5에서 보듯이 S-H 효과를 가하지 않은 속도결과는 그 주파수를 알아보기 힘들 정도로 왜곡이 심하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 하지만 S-H 효과를 가한 속도 결과는 왜곡이 존재하지만 주파수성분을 충분히 안정적으로 얻을 수 있을 정도의 신호로 복원된 것을 볼 수 있다.

따라서, 본 장에서는 1장에서 언급하였듯이 HPF로 인하여 DC항목이 제거되고 이로 인하여 속도 신호가 심하게 왜곡되는 것을 보였으며, S-H effect를 이용하여 DC항목의 제거를 방지하고 속도 신호를 복원할 수 있다는 것을 시뮬레이션을 통하여 보였다.

4. 실험 및 실험 고찰

Synthetic heterodyne 효과를 얻을 때에 보다 정성된 속도 신호를 얻기 위해서는 $\varphi_s(t)$ 의 속도가 낮고 큰 변위로 움직일수록 유리하다. 따라서, 기준 거울을 구동시키기 위하여 간섭계에 진동을 최소화하고 PZT에 비하여 큰 변위를 갖는 Voice coil motor(VCM)를 채택하였다.

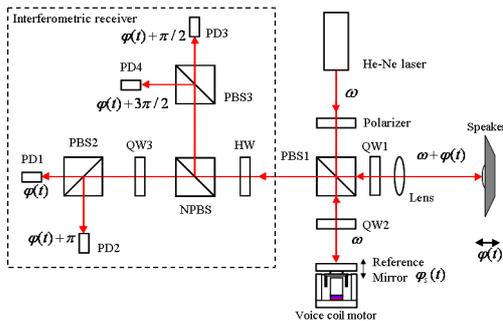


Fig.7 Experimental setup of the homodyne laser interferometer with voice coil motor

Fig. 7은 진동측정을 위한 호모다인 간섭계를 나타낸다. 광원은 빛의 파장이 633nm인 He-Ne레이저이고, 난반사측정을 위하여 간섭계 앞단에 집광용 렌즈를 사용하였으며, 측정 대상체는 미소 변위를 얻기 위하여 스피커를 이용하였다.

Fig. 8은 S-H 효과를 주었을 때와 아닐 때의 주파수 변조된 간섭신호들을 보여준다.

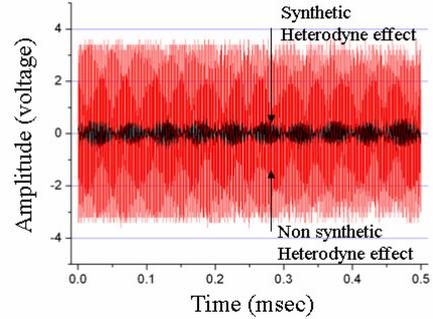
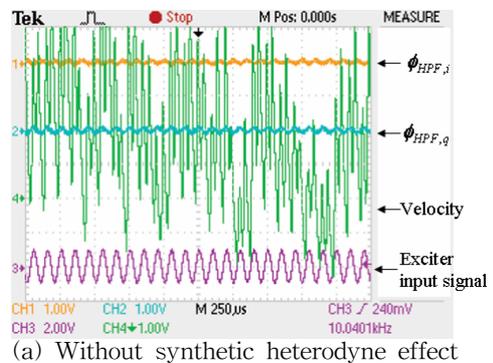
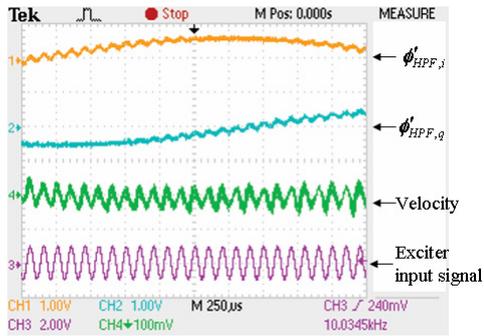


Fig.8 Frequency modulated interference signals

Fig.8에서 보면, S-H 효과를 가하지 않은 간섭신호의 진폭은 그렇지 않을 때의 간섭신호의 진폭보다 약1/5정도로 작았다. 또한 신호의 형태는 S-H 효과를 가한 신호의 경우는 전체적으로 진폭이 균일하게 유지되는 반면, S-H 효과를 가하지 않은 신호는 일정한 주기로 진폭이 변하는 것을 볼 수 있다. 그 결과 Fig. 9를 통하여 이 영향을 확인할 수 있다. Fig.9(a)는 S-H 효과를 가하지 않았을 때의 두 간섭신호와 속도신호를 보여준다. 정현파 형태의 정상적인 속도신호가 나오지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig.9(b)는 약 2Hz정도의 정현파 신호로 VCM을 통하여 기준 거울 가진시켜주어 S-H 효과를 일으켰을 때 속도신호가 복원되는 것을 보여준다. 이 때 간섭신호는 원점을 지나치며 HPF에 영향을 받지 않아 DC정보가 손실되지 않은 것을 확인할 수 있다. 그 결과 가진(Exciting) 신호에 해당하는 주파수의 속도 신호를 얻을 수 있었다.



(a) Without synthetic heterodyne effect



(b)With synthetic heterodyne effect
 Fig.9 Interference signal and velocity signal

따라서, HPF로 인하여 측정정보손실이 발생되어 주파수 변조 신호의 진폭의 크기가 주기적으로 바뀌는 것을 실험을 통하여 확인하였고, 이러한 진폭의 심한 변화가 결국 속도 왜곡의 결과로 나타나는 것을 보였다. S-H 효과로 간섭신호에 주파수를 더해주어 측정정보손실이 발생되지 않고 주파수변조 신호의 진폭이 일정하게 유지되는 것을 실험으로 확인하였다. 결국 주파수변조 신호에 노이즈 성분의 영향이 줄어들어 진동체의 주파수를 얻어낼 수 있는 속도신호가 나오는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

4. 결론

호모다인 간섭계를 사용한 레이저 도플러 바이브로미터 (Laser Doppler vibrometer; LDV)에서 미소 진폭 진동을 측정하기 위하여 Synthetic-heterodyne 기법을 적용하였다. HPF를 사용함으로써 측정 정보에 손실이 발생함을 이론적으로 고찰하였으며, 주파수 변조된 신호에 주기적인 큰 진폭의 변화가 발생하여 속도신호를 얻을 수 없을 정도로 왜곡이 발생하는 것을 시뮬레이션과 실험을 통하여 보였다. 또한 VCM을 활용하여 기준 거울을 약 1~2Hz로 가진하여 S-H 효과를 호모다인 간섭계에 적용하였다. 그 결과 저진폭 기계 진동에 대한 속도신호를 얻어낼 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 예측하고 실험을 통하여 확인하였다.

따라서 호모다인 간섭계를 이용한 저진폭 진동의 측정에서 S-H효과를 사용한다면 측정기의 성능개선에 큰 효과를 얻을 것이다.

참 고 문 헌

(1) Choi, H. S., La, J. P. and Park, K. H., 2006, Rev. Sci. Instrum. 77, 106102.
 (2) Jackson, D. A., Kersey, A. D., M. Corke, and Jones, J. D., 1982, Electron. Lett., vol. 18, pp. 1081-1083.
 (3) Cole, J. H., Danver, B. A. and Bucaro, J. A.,

1982, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE-18, No. 4., pp. 694-697.

(4) A. Dandridge, A. B. Tveten and T. G. Giallorenzi, 1982, vol. QE-18, pp. 1647-1653.

(5) Lo, Yu-Lung and Chuang, Chin-Ho, 2001, Applied Optics LP, vol. 40, Issue 21, pp.3518-3524.

(6) Connelly, Michael J., 2002, J. Opt. A: Pure Appl. Opt., Volume 4, Issue 6, pp. S400-S405.

(7) Cohen, H, 1992, Mathematics for scientists and engineers, Prentice hall, pp. 337-353.