

◆특집◆ 레이저 계측

# 미소 진폭 진동 측정을 위한 기계적 변조 방식의 헤테로다인 간섭계

강성구\*, 라종필\*\*, 윤희선\*, 박기환\*

## Synthetic Heterodyne Interferometry for Measuring Small Amplitude of Vibration

Seong Gu Kang\*, Jong Pil La\*\*, Heesun Yoon\* and Kyi Hwan Park\*

**Key Words** : Synthetic heterodyne (신세탁 헤테로다인), Heterodyne interferometer (헤테로다인 간섭계), Homodyne interferometer (호모다인 간섭계), Frequency shifting algorithm (주파수 천이 알고리즘), Fourier Bessel series (푸리에 베셀 시리즈)

### 1. 서론

광간섭계는 도플러 주파수를 이용하여 진동체의 속도를 측정하는데 사용된다.

헤테로다인 간섭계에서 간섭신호는 AOM 과 같은 주파수 천이 장치를 사용하여 수 MHz 로 변조된다. 따라서 저주파수의 전기적 외란신호는 그 보다 큰 차단 주파수를 가진 고역통과필터를 이용한다면 쉽게 제거할 수 있다. 헤테로다인 간섭계는 주파수-전압 변환기를 이용하여 쉽게 양 방향성 속도 정보를 얻는다.

호모다인 간섭계는 주파수 변조를 하지 않고 도플러 주파수로부터 단방향성 속도 정보를 얻는다. He-Ne 레이저의 반파장보다 작은 진폭의 진동을 측정할 때, 간섭신호의 DC 값이 고역통과필터에 의하여 제거되기 때문에 부정확하고 왜곡된 속도신호가 측정되게 된다. 따라서 수광회로의 고역

통과필터를 사용하는데 주의가 요구된다.

호모다인 간섭계에서 미소 진폭 진동을 측정할 때에 고역통과필터 사용에 의한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 기계적 변조 기법을 사용한다. 기존 미러를 PZT 구동기를 이용하여 레이저의 반파장보다 큰 변위를 가지도록 움직인다. 이 방법은 고역통과필터에 의해 간섭신호의 DC 값이 영향을 받지 않는 간섭신호를 생성한다. 이러한 방법을 일반적으로 신세탁 헤테로다인 간섭계(synthetic heterodyne interferometer)라 칭한다.<sup>1</sup>

Jackson 과 동료 연구자들에 의해 신세탁 헤테로다인 간섭 기법이 처음으로 제안되었다.<sup>2</sup> James 는 진동체의 위상변화를 얻기 위하여 파이버로 구성된 호모다인 간섭계에서 파이버의 기계적 모듈레이션과 전기적인 신세탁 헤테로다인 복조 기법을 제안하였다.<sup>3</sup> Dandrindge 는 신세탁 헤테로다인 간섭계를 구현하여 넓은 동적 영역, 좋은 선형성, 마이크로라디안 분해능의 진동체의 주파수 정보를 얻기위하여 호모다인 간섭계에 다이오드 레이저 모듈레이션 기법과 기계적 모듈레이션 기법을 사용하여 신세탁 헤테로다인 기법을 제안하였다.<sup>4</sup> Lo 는 백색광을 활용한 파이버 타입의 호모다인 간섭계에서 PZT 의 파형을 이용한 모듈레이션 기법과 신세탁 헤테로다인 복조 기법을 접목하여 flyback 문제를 해결하고 이를 refractometer 에 적

\* 광주과학기술원 기전공학과  
Tel. 062-970-2391, Fax. 062-970-2384  
Email khpark@gist.ac.kr

나노 측정 분야, 광 간섭계를 이용한 진동 및 거리 측정, 나노 현미경을 위한 센서 및 엑츄에이터 개발에 관심을 두고 연구 활동을 하고 있다.

\*\* 광주 삼성 전자 압축기 개발부

용하였다.<sup>5</sup>

앞선 연구들에서 소개된 기계적 변조기법은 모두 고주파수를 사용하여 기존 광학적 주파수 천이 모듈이 사용된 헤테로다인 간섭계의 단점을 극복하기 위해 소개되었다. 하지만 이러한 고주파수를 사용한 기계적 변조기법은 기계적인 진동의 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서 저주파수를 사용한 기계적 변조기법이 적용된 신세틱 헤테로다인 간섭계는 기계적 진동뿐만 아니라 미소 진폭 진동시에 나타나는 문제를 해결하기 위하여 제안되었다. 이번 연구에서 제안한 신세틱 헤테로다인 간섭 기법은 진동 측적 응용의 목적으로 개발되었다. 본 논문에서는 간섭 신호에 해당되는 Fourier-Bessel 함수 표현을 이용하여 고역 통과 필터에 의해 속도 신호가 왜곡되는 원인을 분석하고, 문제점을 해결하기 위해 제안한 신세틱 헤테로다인 간섭 기법이 타당한 지에 대해 이론적으로 분석하였다. 마지막으로 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

## 2. SYNTHETIC HETERODYNE INTERFEROMETER

### 2.1 Optical interference signal

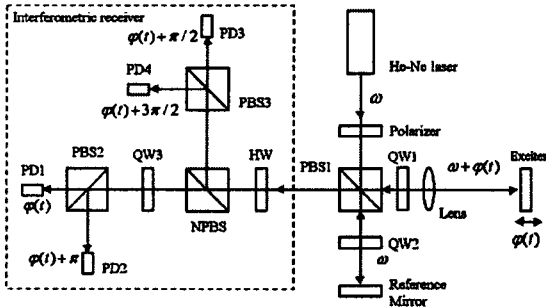


Fig. 1 The homodyne optical interferometer

Fig. 1 은 호모다인 레이저 간섭계의 광학 구성을 보여준다. He-Ne 레이저 소스에 의한 편광 빔 분리기(PBS)1 을 통과한 레이저 빔은 기준 빔과 측정 빔으로 나뉘어 진다. 1/4 파장판(QW)1 과 2 는 출력된 빔이 He-Ne 레이저 소스로 돌아오는 것을 방지하고 광경로를 유지해 주기 위해 사용된다. PBS1 을 통과한 간섭 빔은 4 개의 빔으로 나뉘어 지고 PD1 부터 PD4 까지의 포토 다이오드에서

수광된다. 그리고 나서, 수광회로에서 나온 네 개의 간섭신호로부터 얻어진 in-phase 간섭신호,  $\Phi_{m,i}$  과 quadratic 간섭신호  $\Phi_{m,q}$  는 다음과 같이 표현된다.<sup>6</sup>

$$\Phi_{m,i} = A_1 + B_1 \cos(\varphi(t) + \varphi_0) \quad (1)$$

$$\Phi_{m,q} = A_2 + B_2 \sin(\varphi(t) + \varphi_0) \quad (2)$$

$$\varphi(t) = \hat{\varphi} \cos(\omega t) \quad (3)$$

$A_1$  과  $A_2$  는 레이저 세기 변화에 의한 DC offset 이다.  $B_1$  과  $B_2$  는 간섭신호의 진폭이다.  $\varphi(t)$  는 진동체의 조화 운동에 의해 발생된 위상차이이고,  $\varphi_0$  는 초기 위상을 의미한다.  $\lambda$  가 레이저의 파장이고  $a$  가 진동 진폭일 때,  $\hat{\varphi}$  는  $2\pi a/\lambda$  을 의미한다.

$\Phi_{m,i}$  과  $\Phi_{m,q}$  를 얻기 위해 사용된 아날로그 회로에서, 고역통과 필터는 저주파 노이즈와 DC offset,  $A_1$  과  $A_2$  를 제거하기 위해 일반적으로 사용된다.

HPF 가 사용될 때, 부정확하고 왜곡된 속도 신호 측정의 문제점에 대해 고찰하기 위해  $\Phi_{m,i}$  과  $\Phi_{m,q}$  는 Bessel fourier series 를 이용하여 다음과 같이 전개할 수 있다.<sup>7</sup>

$$\begin{aligned} \Phi_{m,i} = & A_1 + B_1 J_0(\hat{\varphi}) \cos(\varphi_0) \\ & + B_1 \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\hat{\varphi}) \cos(2n\omega t) \right] \cos(\varphi_0) \\ & - B_1 \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} J_{2n-1}(\hat{\varphi}) \cos((2n-1)\omega t) \right] \sin(\varphi_0) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{m,q} = & A_2 + B_2 J_0(\hat{\varphi}) \sin(\varphi_0) \\ & + B_2 \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\hat{\varphi}) \cos(2n\omega t) \right] \sin(\varphi_0) \\ & + B_2 \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} J_{2n-1}(\hat{\varphi}) \cos((2n-1)\omega t) \right] \cos(\varphi_0) \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서,  $J_n$  은 n 차 Bessel 함수이고, 여기서 주목해야 할 것은  $\Phi_{m,i}$  과  $\Phi_{m,q}$  이 DC offset 인  $A_1$  과  $A_2$  에 추가하여 DC 값인  $B_1 J_0(\hat{\varphi}) \cos(\varphi_0)$ ,  $B_2 J_0(\hat{\varphi}) \sin(\varphi_0)$  을 포함하는 것이다.

Fig. 2 는 진동체의 진동주파수가 15KHz,  $B_1 = B_2 = B$  이고  $\varphi_0 = 0$  라 가정할 때, 진동 진폭이 He-Ne 레이저의 파장의 1/2 보다 작을 때, DC

offset 인  $A_1$  과  $A_2$  그리고 DC 성분인  $B_1J_0(\hat{\varphi})\cos(\varphi_0)$  와  $B_2J_0(\hat{\varphi})\sin(\varphi_0)$  을 표시한  $\Phi_{m,i}$  과  $\Phi_{m,q}$  을 보여준다.

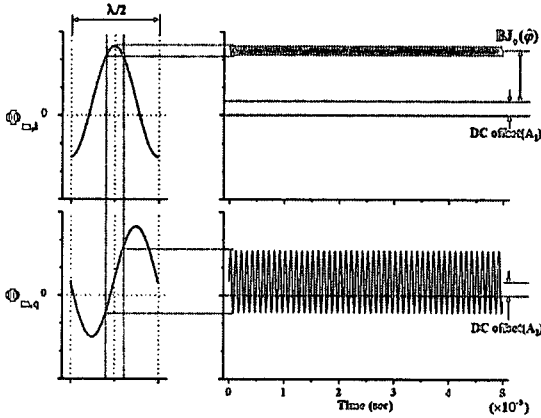


Fig. 2  $\Phi_{m,i}$  and  $\Phi_{m,q}$  where the DC offsets,  $B_1J_0(\hat{\varphi})\cos(\varphi_0)$  and  $B_2J_0(\hat{\varphi})\sin(\varphi_0)$  are indicated when the vibration amplitude is smaller than at least 1/2 of the wavelength of He-Ne laser

고역통과 필터가 사용될 때, 고역통과필터는 속도 신호의 요소인  $BJ_0(\hat{\varphi})$  를 제거하는 문제를 야기시킨다. 따라서, 고역통과 필터 처리된 간섭신호로부터 얻어진 속도신호는 간섭신호가 복조회로에서 처리될 때, 부정확하고 왜곡된 결과를 보이게 된다. 그 결과, 고역통과필터를 거친  $(\Phi_{m,i})_{HPF}$  과  $(\Phi_{m,q})_{HPF}$  는 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$(\Phi_{m,i})_{HPF} = B \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\hat{\varphi}) \cos(2n\omega t) \right\} \quad (6)$$

$$(\Phi_{m,q})_{HPF} = B \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} J_{2n-1}(\hat{\varphi}) \cos((2n-1)\omega t) \right\} \quad (7)$$

$(\Phi_{m,i})_{HPF}$  과  $(\Phi_{m,q})_{HPF}$  는 식 (1), (2), (4), (5)를 사용함으로써 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있게 된다.

$$(\Phi_{m,i})_{HPF} = B \cos(\varphi(t)) - BJ_0(\hat{\varphi}) \quad (8)$$

$$(\Phi_{m,q})_{HPF} = B \sin(\varphi(t)) \quad (9)$$

호모다인 간섭계에서는 양의 속도만을 얻는다.

속도의 방향성을 판별하기 위하여 전기적인 주파수 변조 알고리즘을 통한 주파수 천이 기법을 신호처리회로에 적용하였다.<sup>8</sup>

식 (8)과 (9)를 이용하여  $\omega_c$  만큼 주파수 천이된 간섭신호  $\Phi_{m,\omega}$  로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_{m,\omega} &= (\Phi_{m,i})_{HPF} \cdot \cos(\omega_c t) + (\Phi_{m,q})_{HPF} \cdot \sin(\omega_c t) \\ &= B \cos(\varphi(t) + \omega_c t) - BJ_0(\hat{\varphi}) \cos(\omega_c t) \end{aligned} \quad (10)$$

Fig. 3 에 나타낸  $J_0(\hat{\varphi})$  는  $\hat{\varphi}$  에 의존하여 변화된다.  $\hat{\varphi}$  의 값이 작을 때, 즉, 진동의 진폭이 작을 때,  $J_0(\hat{\varphi})$  는 1 에 가깝게 된다. 따라서 식 (10)으로 기술된  $\Phi_{m,\omega}$  는 Fig. 4(a) 와 같이 심하게 변동된다.

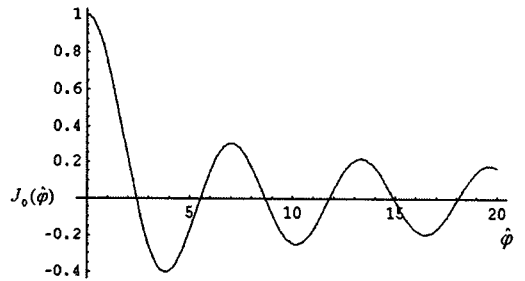


Fig. 3 Plot of  $J_0(\hat{\varphi})$  with respect to  $\hat{\varphi}$

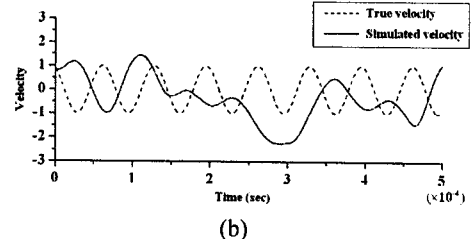
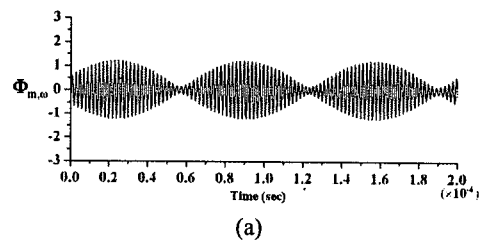


Fig. 4 (a)  $\Phi_{m,\omega}$  (b) demodulated velocity

Fig. 4(a)는 진동 주파수가 15KHz 이고 천이 주파수  $\omega_c$  가 1MHz 일 때, 식(10)에 기술된  $\Phi_{m,\omega}$  을

보여준다. 15KHz 에서 매우 작은 진동 진폭을 가질 때,  $\Phi_{m,\omega}$  의 진폭이 심하게 변동이 되는 것을 관측할 수 있다. 주파수-전압 변환기<sup>8</sup>를 사용한 복조 알고리즘을 적용한다면,  $\Phi_{m,\omega}$  의 진폭이 작은 부분에서 주파수-전압 변환기가 제 역할을 수행할 수 없게 된다.  $\Phi_{m,\omega}$  와 비교해서 전기적인 노이즈가 두드러지게 나타날 수 있는 실제 응용에서 속도는 Fig. 4(b)에서 보여지듯이 그 주파수를 알 수 없을 만큼 심하게 왜곡된다. 실선을 이용한 시뮬레이션된 속도는 점선을 이용한 이상적인 속도와 비교하여 나타내었다.

### 2.2 Synthetic-heterodyne interferometer

작은 진동 폭의 측정을 위해 고역통과필터 사용의 문제점을 해결하기 위해 기계적 위상 변조 기법을 사용한 신세틱 헤테로다인 간섭계를 제안한다. 기준 거울은 PZT 를 사용하여 레이저 파장의 1/2 보다 큰 변위로 가진하여 준다. 이 때, 얻어지는 간섭신호  $\Phi'_{m,i}$  과  $\Phi'_{m,q}$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi'_{m,i} = A_1 + B \cos(\varphi(t) + \varphi_s(t)) \quad (11)$$

$$\Phi'_{m,q} = A_2 + B \sin(\varphi(t) + \varphi_s(t)) \quad (12)$$

여기에서  $\varphi_s(t)$  는 PZT 액츄에이터에 의해 진동으로 인한 위상차이다. 본 논문에서는 삼각파를 입력 신호로 적용하였다.

작은 진동 진폭의 측정을 위해 호모다인 간섭계에서 신세틱 변조 기법을 사용하여 고역통과 필터 사용의 문제점을 해결하는 것을 보여주기 위해 Fourier-Bessel series 를 이용하여 식 (11)과 식 (12) 는 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi'_{m,i} &= A_1 + BJ_0(\hat{\varphi}) \cos(\varphi_s(t)) \\ &+ B \left[ 2 \cos \varphi_s(t) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\hat{\varphi}) \cos(2n\omega t) \right] \cos(\varphi_s(t)) \\ &- B \left[ 2 \sin \varphi_s(t) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\hat{\varphi}) \sin\{(2n-1)\omega t\} \right] \sin(\varphi_s(t)) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Phi'_{m,q} &= A_2 + BJ_0(\hat{\varphi}) \sin(\varphi_s(t)) \\ &+ B \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\hat{\varphi}) \cos(2n\omega t) \right] \sin(\varphi_s(t)) \end{aligned}$$

$$+ B \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} J_{2n-1}(\hat{\varphi}) \cos((2n-1)\omega t) \right] \cos(\varphi_s(t)) \quad (14)$$

고역통과필터를 통과한 간섭신호,  $(\Phi'_{m,i})_{HPF}$  과  $(\Phi'_{m,q})_{HPF}$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (\Phi'_{m,i})_{HPF} &= BJ_0(\hat{\varphi}) \cos(\varphi_s(t)) \\ &+ B \left[ 2 \cos \varphi_s(t) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\hat{\varphi}) \cos(2n\omega t) \right] \cos(\varphi_s(t)) \\ &- B \left[ 2 \sin \varphi_s(t) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\hat{\varphi}) \sin\{(2n-1)\omega t\} \right] \sin(\varphi_s(t)) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} (\Phi'_{m,q})_{HPF} &= BJ_0(\hat{\varphi}) \sin(\varphi_s(t)) \\ &+ B \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(\hat{\varphi}) \cos(2n\omega t) \right] \sin(\varphi_s(t)) \\ &+ B \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} J_{2n-1}(\hat{\varphi}) \cos((2n-1)\omega t) \right] \cos(\varphi_s(t)) \end{aligned} \quad (16)$$

만약 고역통과필터의 차단 주파수가  $\varphi_s(t)$  의 간섭주파수보다 낮다면,  $\cos \varphi_s(t)$  과  $\sin \varphi_s(t)$  에 의해 변조된  $BJ_0(\hat{\varphi})$  을 제외하고  $A_1$  과  $A_2$  의 DC offsets 만이 제거된다.

앞 절 2.1 에서 언급한 주파수 천이 알고리즘을 사용한 주파수 천이된 간섭신호  $\Phi'_{m,\omega}$  는 식 (15)와 식 (16)를 사용하여  $\omega_c$  만큼 천이하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi'_{m,\omega} = B \cos(\varphi(t) + \varphi_s(t) + \omega_c t) \quad (17)$$

신세틱 헤테로다인을 사용한 간섭신호  $(\Phi'_{m,i})_{HPF}$  과  $(\Phi'_{m,q})_{HPF}$  는 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에서 보여진다. 신세틱 헤테로다인 기법은 고역주파수에 의해 간섭신호의 DC 값이 영향을 받지 않도록 간섭신호를 주기적으로 영점에 교차하도록 만들어 준다. 간섭신호의 영점 교차 주기는 삼각파입력의 속도와 관계된다.

식 (17)에 기술된  $\Phi'_{m,\omega}$  는 시뮬레이션 사용된 조건들 중에 기준 거울의 가진 주파수와 진폭이 각각 4Hz 와 4um 이고, 진동체의 주파수와 진폭이 각각 15KHz 이고 10nm 일 때, Fig. 5(c)과 같이 보

여진다.

$\Phi'_{m,\omega}$ 의 진폭의 변동량은 Fig. 4(a)와 비교하여 상당히 감소한 것을 볼 수 있다.  $\Phi'_{m,\omega}$ 의 진폭이 충분히 유지될 때, 주파수-전압 변환 회로<sup>9</sup> 거친 속도는 Fig. 5(d)에서 보듯이 왜곡이 없이 출력되었다.

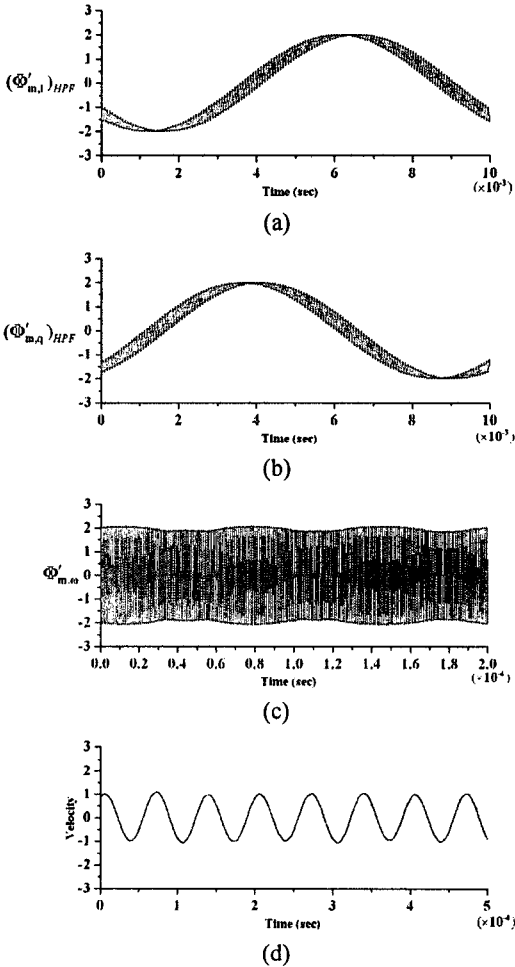


Fig. 5 The results with using the synthetic heterodyne technique (a)  $(\Phi'_{m,i})_{HPF}$  (b)  $(\Phi'_{m,q})_{HPF}$  (c)  $\Phi'_{m,\omega}$  (d) velocity

### 3. Experiment

실험은 PZT에 부착된 기준 거울의 가진 주파수와 진폭이 각각 4Hz와 4 $\mu$ m이고 삼각파를 사용하였으며, 진동체의 주파수와 진폭이 각각 15KHz

이고 10nm 일 때, 호모다인 간섭계에서 수행되었다.

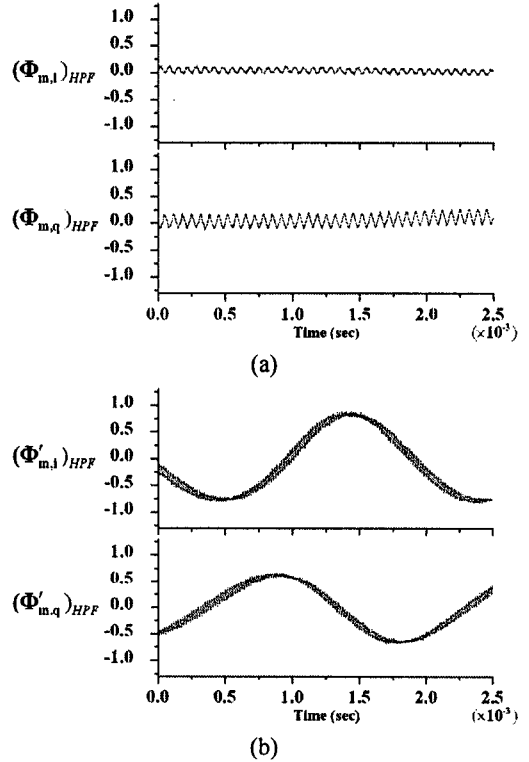


Fig. 6 Modulated interference signals (a) when the synthetic technique is not used (b) when the synthetic technique is used

Fig. 6(a)는 신세틱 헤테로다인 기법을 사용하지 않았을 때, 고역통과필터를 통과한 간섭신호  $(\Phi'_{m,i})_{HPF}$  과  $(\Phi'_{m,q})_{HPF}$  를 실험적으로 얻은 결과를 보여준다. Fig. 6(b)는 기준 거울을 PZT를 이용하여 가진시켜 주어 신세틱 헤테로다인 기법을 사용하였을 때, 영점을 교차하는  $(\Phi'_{m,i})_{HPF}$  과  $(\Phi'_{m,q})_{HPF}$  를 실험적으로 얻은 결과를 보여준다. 그 결과 신호는 Fig. 2와 Fig. 5(a)와 (b)에서 보여진 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 7(a)와 (b)는 신세틱 헤테로다인 기법이 적용되지 않았을 때와 적용되었을 때의 변조된 간섭신호인  $\Phi_{m,\omega}$  과  $\Phi'_{m,\omega}$ 에 대해 보여준다.  $\Phi_{m,\omega}$ 의 진폭은  $\Phi'_{m,\omega}$ 의 진폭에 비해 변동이 적은 것을 볼 수 있다. Fig. 4(a)와 Fig. 5(c)에서의 시뮬레이션 결과와 거의 일치하였다.

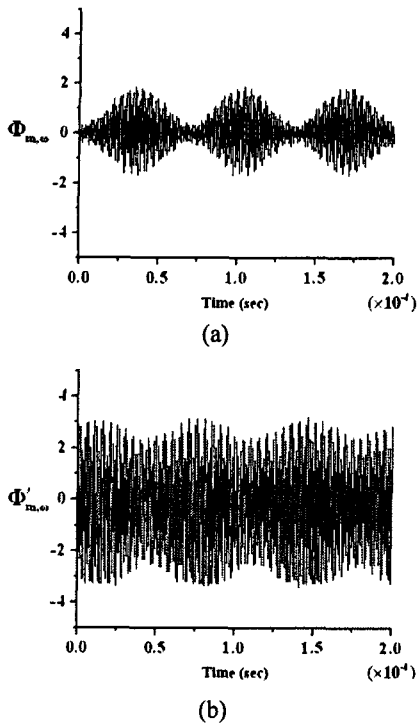
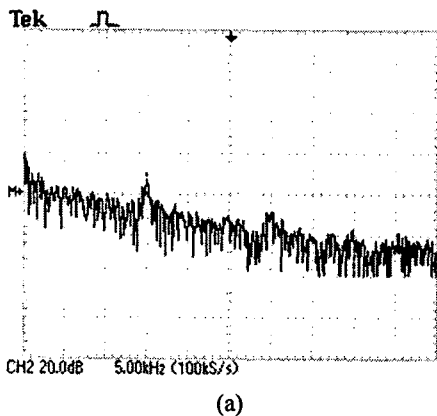
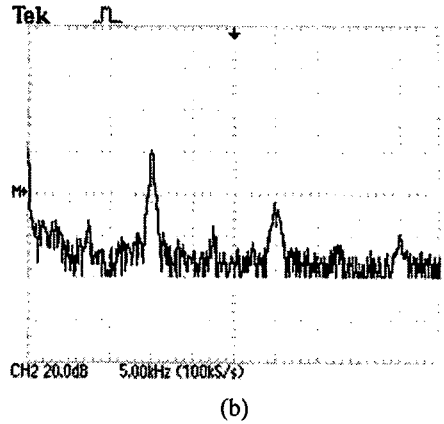


Fig. 7 Plots of (a)  $\Phi_{m,\omega}$  and (b)  $\Phi'_{m,\omega}$

Fig. 8(a)와 (b)는 신세탁 헤테로다인이 적용되지 않았을 때와 적용되었을 때의 측정된 속도의 주파수 스펙트럼을 보여준다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 전기적인 노이즈의 영향으로 인해 측정된 속도에 해당하는 주파수가 분명히 보이지 않았다. 하지만 신세탁 기법이 적용되었을 때, Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 속도에 해당하는 주파수가 분명히 보이게 된다.



(a)



(b)

Fig. 8 The measured spectrum when the synthetic technique is (a) not used and (b) used

#### 4. 결론

기계적 위상 변조 기법이 사용된 신세탁 헤테로다인 간섭계는 물체의 미소 진동을 측정하기 위해 호모다인 간섭계에 적용되었다. 진동의 미소 진폭을 호모다인 간섭계를 이용하여 측정하는데 발생하는 속도 신호의 왜곡 문제를 Fourier Bessel series 를 이용하여 수학적으로 분석하였으며, 신세탁 헤테로다인 기법이 어떻게 속도 신호의 왜곡문제를 해결하는 지에 대해 이론적으로 보였다.

이번 논문에서 제안한 신세탁 헤테로다인 기법이 타당한지에 대해 시뮬레이션과 실험을 통하여 증명하였다.

#### 참고문헌

1. Giallorenzi, T., Bucaro, J., Dandridge, A., Sigel, G., Cole, J., Rashleigh, S. and Priest, R., "Optical Fiber Sensor Technology," IEEE J. Quant. Electron., Vol. QE-18, Issue 4, pp. 626-664, 1982.
2. Jackson, D. A., Kersey, A. D., Corke, M. and Jones, J. D., "Pseudo-heterodyne detection scheme for optical interferometers," Electron. Lett., Vol. 18, Issue 25, pp. 1081-1083, 1982.
3. Cole, J. H., Danver, B. A. and Bucaro, J. A., "Synthetic-heterodyne interferometric demodulation," IEEE J. Quant. Electron., Vol. QE-18, No. 4, pp. 694-697, 1982.

4. Dandridge, A., Tveten, A. B. and Giallorenzi, T. G., "Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier," IEEE J. Quant. Electron., Vol. QE-18, No. 10, pp. 1647-1653, 1982.
5. Lo, Y. L. and Chuang, C. H., "New synthetic-heterodyne demodulation for an optical fiber interferometry," IEEE J. Quant. Electron., Vol. 37, No. 5, pp. 658-663, 2001.
6. La, J. P. and Park, K. H., "High Speed FM Demodulator of a Homodyne Laser Interferometer for Measuring Mechanical Vibration," Optical Engineering, Vol. 43, No. 43, pp. 1341-1349, 2004.
7. Cohen, H., "Mathematics for scientists and engineers," Prentice hall, pp. 337-353, 1992.
8. Choi, H. S., La, J. P. and Park, K. H., "Electronic frequency modulation for the increase of maximum measurable velocity in a heterodyne laser interferometer," Review of Scientific Instruments, Vol. 77, Issue 10, pp. 106102-106103, 2006.
9. La, J. P., Choi, H. S. and Park, K. H., "Hetrodyne Laser Doppler Vibrometer using a Zeeman stabilized He-Ne Laser with an One-shot F/V Converter," Review of Scientific Instruments, Vol. 76, Issue 2, pp. 025112-025117, 2005.