

광음향 변조기의 단일 경로와 이중 경로를 동시에 사용한 이중 간섭계 방식의 레이저 도플러 진동계

오현석¹, 정연홍², 조재흥^{1*}

¹한남대학교 대학원 광,센서공학과, ²국제대학교 안경광학과

Laser Doppler Vibrometer of Heterodyne Interferometer Type with Simultaneous Utilization of Single Pass and Double Pass in an Acousto-Optic Modulator

Hyun Seok Oh¹, Youn Hong Jeong², Jae Heung Jo^{1*}

¹Department of Photonics and Sensors, Graduate School, Hannam University

²Department of Optometry, Kookje University

요약 한 대의 광음향 변조기에 대한 단일 경로와 이중 경로를 각각 통과한 서로 다른 2개의 반송 주파수를 갖는 물체빔 2개와 기준광을 사용하여 서로 다른 두 위치에서 발생하는 진동수를 동시에 측정하는 3개 빔 이중 간섭계 방식의 레이저 도플러 진동계(LDV)를 제안한다. 이러한 LDV의 이론적 배경을 위하여 3개의 서로 다른 반송주파수가 반공 주파수가 서로 다른 2개의 물체 빔과 기준광을 서로 간섭시키는 간섭이론을 기술한다. 3개 빔 이중 간섭계 방식의 레이저 도플러 진동계의 변조 주파수가 40 MHz인 광음향 변조기를 한 번 통과한 물체빔과 두 번 통과한 물체빔의 반송 주파수는 각각 40 MHz와 80 MHz이며, 이 값들을 이용하여 LDV의 이론을 통하여 2군데의 물체 진동수를 동시에 감지할 수 있는 이론적 근거를 확인하였다. 논문에서는 이러한 헬륨네온 레이저와 광음향 변조기 1대를 사용하여 두 물체빔을 사용하여 동시에 두 지점의 서로 다른 진동주파수를 측정할 수 있는 것을 실험적으로 확인하였다. 이 방법을 확장하면 물체의 서로 다른 2개 이상의 측정지점에 대한 진동 주파수를 쉽고 간단하게 측정할 수 있다.

Abstract We propose a laser Doppler vibrometer (LDV) of three beams heterodyne interferometer type with a photodetector composed of two object beams having different carrier frequencies. With the single and double-passes of an acousto-optic modulator (AOM) and a reference beam, the LDV simultaneously measures two different vibrational frequencies generated at two positions. To build up the theoretical background, we describe the interference theory using a reference beam and two different object beams of different carrier frequencies. The carrier frequencies of two object beams passing through the single and double-passes in the AOM are 40 MHz and 80 MHz, respectively, and the modulation frequency of the AOM is 40 MHz. Using these frequency values in the LDV theory, we confirm the theoretical justification of a laser Doppler vibrometer (LDV) of three beams heterodyne interferometer type. In addition, this paper confirms, through simulation and experiment, that the LDV can detect two different vibrational frequencies caused by simultaneous vibrations at two different points. Thus, this method can be utilized simply and readily to observe more than two different vibrational frequencies of objects.

Keywords : Laser Doppler Vibrometer, Heterodyne Interferometer, Double-Pass Acousto-Optic Modulator, Vibration Frequency Measurement, Three Beams Interferometer

*Corresponding Author : Jae Heung Jo(Hannam Univ.)

email: jhjo@hnu.kr

Received October 5, 2021

Revised November 8, 2021

Accepted March 4, 2022

Published March 31, 2022

1. 서론

진동하는 물체에서 반사된 레이저광의 도플러 주파수를 읽어서 물체의 진동수를 알아내는 방법을 레이저 도플러 진동계(LDV: Doppler Vibrometer)라고 하며, 이는 1964년 Yeh. Y 와 Cummins가 헬륨-네온 레이저를 이용하여 유체 속도를 측정하는 것으로 유래되었다[1]. LDV는 빛을 이용하는 비접촉식 진동계로서 장거리 측정도 가능하기 때문에 기계 시스템, 전자기기, 자동차, 가전, 토목, 건축물 등에 사용되는 회전기기, 초소형 첨단기기, 또는 위험 환경에 설치된 장비 등의 진동을 측정하는데 많이 사용한다[2]. 또한 LDV는 전자기 간섭에 강하고, 빛의 파장을 사용하기 때문에 높은 분해능을 얻을 수 있으며, 속도에 대해 거의 선형적인 출력을 얻을 수 있고, 진동에 대한 변위의 방향을 구별 가능하며 높은 신호 대 잡음 비를 갖는 장점이 있다[3].

지금까지의 대부분의 LDV는 이중 간섭계로 구성하여 물체의 한 지점에서 발생하는 진동만 측정함으로써 진동을 분석하여 구조물의 결함 및 이상 진단, 음향 분석 등 여러 위치나 각도에서 불연속 측정 방식 또는 스캐닝 방식을 이용하여 측정하는 것이 일반적이다[4,5]. 한편 진동하는 물체에 단일 빔으로 조사하는 LDV에서 측정된 레일리 산란파의 편광과 주파수로부터 진동하는 물체의 표면 탄성파에 대한 속도와 변위를 측정하는 응용도 제안된 바도 있다[6]. 또한 LDV 자체의 진동을 보상하여 진동 측정의 정확도를 높이는 연구도 진행되었으며[7,8], LDV의 기계적, 전자기적 안정을 위한 광섬유 LDV도 연구되었다[9]. 그리고 최근에는 레이저 도플러 진동계를 이용하여 구조물 물리량 추정[10], 철도 귀도 변위 계측[11], 액체 거동 측정[12], 회전체 진동측정[13] 등의 다양한 계측 공학 분야에 사용되고 있다. 그러나 대부분의 연구는 한 대의 LDV를 이용하여 한 지점의 진동을 측정하는 것이며, 서로 다른 두 지점을 측정할 때에는 2대 이상의 레이저나 Bragg 셀 또는 광 검출기 등을 이용하기 때문에 측정시스템 구성 비용이 복잡하면서 비싸지는 단점이 있다. 대부분의 LDV는 1개의 물체빔을 사용하는 데, 대부분 광음향 변조기(Acousto-Optic Modulator: AOM)의 1차 회절광에서 나오는 변조주파수만을 가지고 있거나[4,9], 또는 동일한 AOM에서 나온 1차 회절광을 다시 역으로 AOM을 지나가게 하여 주파수가 2배인 변조주파수를 갖는다[6].

본 논문에서는 한 대의 AOM만을 사용하여 서로 다른 위치에서 발생하는 진동을 동시에 측정하기 위해서 이

AOM에 단일 경로 및 이중 경로 광음향 변조 시스템(Single-Pass and Double-Pass Acousto-Optic Modulator System; AP/DPAOMS)을 적용하여 서로 다른 2개의 변조 주파수를 갖는 물체빔(Object Beam)을 만들었으며, 이 두 물체빔과 레이저의 기준빔(Reference Beam)과의 이중 간섭법을 이용하여 서로 다른 두 지점의 진동을 동시에 측정하는 이중 간섭계 방식의 LDV를 제안하고자 한다. 즉 레이저 광원, AOM, 광 검출기를 각각 1대만을 사용하여 이 2가지 변조 주파수를 동시에 발생시킨 후, 각각 진동하는 서로 다른 두 지점에서 반사된 물체빔과 기준빔이 서로 간섭하는 이중 간섭계인 AP/DPAOMS LDV를 구성하여 서로 다른 두 지점의 진동 주파수를 구별하면서 동시에 검출이 가능하도록 하고자 한다.

2. 3개 빔을 사용한 이중 간섭계의 간섭신호

2.1 이론

AOM에서 단일 경로를 지나는 1차 회절광의 광 주파수가 기준빔의 광 주파수 f_0 로부터 AOM의 브라그 변조 주파수(f_B)인 $f_{2B} = f_B$ 만큼 변조된 입사빔 2와 AP/DPAOMS를 사용하여 1차 회절광을 다시 동일한 AOM을 통과시켜서 광 주파수가 $f_{1B} = 2f_{2B}$ 만큼 변조된 이중 경로의 입사빔1을 동시에 발생시킨다. 여기에서 이 두 변조 주파수를 서로 다른 반송 주파수(Carrier Frequency)라고 한다. 그리고 이 AOM에 의해서 서로 다른 주파수로 변조된 입사빔 1과 2를 f_{s1} 와 f_{s2} 의 신호 주파수(Signal Frequency)로 정현파적으로 진동하는 서로 다른 두 지점의 스피커1과 2에 입사 후 반사시켜서 1개의 광 검출기로 동시에 입사시킨다. 그러면 두 개의 스피커로부터 반사된 물체빔1과 2의 전기장 E_1 과 E_2 가 기준빔의 전기장 E_0 과 광 검출기에서 헤테로다인 간섭을 한다. 이때 광 검출기에서 동시에 간섭을 하는 3개의 빔을 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_0 = E_0 \cos \omega (2\pi ft) \quad (1)$$

$$E_1 = E_1 \cos [2\pi (f + f_{1B})t + \delta_1(t)] \quad (2)$$

$$E_2 = E_2 \cos [2\pi (f + f_{2B})t + \delta_2(t)] \quad (3)$$

여기에서 E_0 , E_1 , E_2 는 각각 기준빔과 두 물체빔 1, 2의 전기장 진폭이며 3개의 빔은 모두 편광이 같다고 가정하

였으며, $\delta_1(t)$ 와 $\delta_2(t)$ 는 서로 다른 두 스피커 1과 2진동에 의해 발생된 위상 변화를 나타낸다. 함수 발생기(Function Generator)를 사용하여 진폭과 주파수가 다른 사인 함수로 구동하는 두 스피커의 변위 $S_1(t)$ 와 $S_2(t)$ 를 $S_1(t) = A_1 \sin(2\pi f_{s1}t)$ 와 $S_2(t) = A_2 \sin(2\pi f_{s2}t)$ 로 놓으면 스피커의 진동에 의한 두 스피커의 위상 변화는 각각 $\delta_1(t) = \frac{4\pi}{\lambda} S_1(t)$ 와 $\delta_2(t) = \frac{4\pi}{\lambda} S_2(t)$ 가 된다. 여기에서 A_1 과 A_2 는 두 스피커 1, 2의 진동에 대한 각각의 진폭이고, f_{1B} 와 f_{2B} 는 보통 수십 MHz이고 두 스피커의 신호 주파수 f_{s1} 와 f_{s2} 는 수 kHz 정도이므로 기준빔의 광 주파수인 f 와는 $f_{1B}, f_{2B}, f_{s1}, f_{s2} \ll f$ 가 된다. 신호 변조에서 식 (1) ~ (3)으로 표현한 기준빔과 두 물체빔이 동시에 광 검출기에서 검출하는 세 빔의 전기장 합의 제곱의 시간 평균인 복사조도 I 는 다음과 같다[14].

$$I = I_0 \left[1 + \frac{2}{3} \left\{ \cos(2\pi f_{1B}t + \frac{4\pi}{\lambda} A_1 \sin(2\pi f_{s1}t)) + \cos(2\pi f_{2B}t + \frac{4\pi}{\lambda} A_2 \sin(2\pi f_{s2}t)) + \cos(2\pi(f_{1B} - f_{2B})t + \frac{4\pi}{\lambda} (A_1 \sin(2\pi f_{s1}t) - A_2 \sin(2\pi f_{s2}t))) \right\} \right] \quad (4)$$

여기에서 I_0 는 $t=0$ s에서 I 의 1/3에 해당하는 복사조도이다. 식 (4)에서 교류 성분만 선택하고 스피커의 진동 진폭인 A_1 과 A_2 가 작아서 위상 변조되는 값이 매우 작다면 이 교류 성분의 스펙트럼은 식 (4)의 교류 성분의 푸리에 변환의 결과이고, 이를 이용하여 식 (4)를 다시 표현하면 베셀 함수의 합으로 전개가 가능하다. 그러면 교류 성분에 대한 광 검출기의 출력 신호 $s(t)$ 는 다음과 같이 식 (5)의 복사조도 I 의 교류 성분에 비례한다.

$$s(t) \propto A_1 \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} J_n(\beta_1) \cos\{2\pi(f_{1B} + n f_{s1})\} + A_2 \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} J_m(\beta_2) \cos\{2\pi(f_{2B} + m f_{s2})\} + \frac{A_1 A_2}{2} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} J_n(\beta_1) J_m(\beta_2) \cos\{2\pi(f_{1B} + f_{2B} + n f_{s1} + m f_{s2})\} + \frac{A_1 A_2}{2} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} J_n(\beta_1) J_m(\beta_2) \cos\{2\pi(f_{1B} - f_{2B} + n f_{s1} - m f_{s2})\} \quad (5)$$

여기에서 $J_n(\beta_1)$, $J_m(\beta_2)$ 는 1종 n 차 및 m 차 베셀 함수이고, n 과 m 은 정수이며, β_1 과 β_2 는 각각 $E1$ 과 $E2$ 에 대한 PM(Phase Modulation) 변조 지수를 나타내는 값이다. 식 (5)에서 첫 번째 항은 f_{1B} 를 중심으로 한 측파대에 $n f_{s1}$ 의 스펙트럼이 $J_n(\beta_1)$ 의 크기로 펼쳐진 스펙트럼의 합이 만드는 신호이고, 두 번째 항은 f_{2B}

를 중심으로 한 측파대에 $m f_{s2}$ 의 스펙트럼이 $J_m(\beta_2)$ 의 크기로 펼쳐진 스펙트럼의 합이 만드는 신호이다. 끝으로 세 번째 항은 이 두 항의 곱으로 표현된 스펙트럼들의 합으로 구성된 신호의 항이다. 일반적으로 변조 지수 β_1 과 β_2 가 매우 작은 경우에는 첫 번째 항과 두 번째 항에서 $n, m = +1, 0, -1$ 의 세 베셀 함수의 항만이 크기가 의미가 있고, 나머지 항들은 무시할 수 있으며, 세 번째 항의 효과도 거의 사라진다. 그러므로 스피커의 진폭을 매우 작게 구동하면 3개의 빔이 간섭한 신호의 스펙트럼에서 f_{1B} 와 f_{2B} 의 측파대에서 스피커의 정현파 진동에 대한 f_{s1} 과 f_{s2} 를 측정할 수 있으며, 스피커의 진폭이 클 경우나 비정현파적 진동이 스피커에 인가되면 식 (4)에서 위상항에 정현파의 표현을 대입하지 말고 스피커에 인가된 함수를 넣어서 스펙트럼을 시뮬레이션하거나 실험적으로 구하면 서로 다른 2개 지점의 진동수를 분석하여 동시에 알 수 있다.

2.2 시뮬레이션 및 분석

Fig. 1은 AP/DPAOMS LDV를 사용한 $E0$, $E1$, $E2$ 의 3개 빔에 대한 이중 간섭의 결과를 나타내는 식 (4)를 워크스테이션(HP, Z820)으로 MATLAB으로 계산하여 양의 주파수 영역만 계산한 FFT(Fast Fourier Transform) 시뮬레이션의 결과이다. 시뮬레이션에서 사용한 파장 $\lambda = 532$ nm로 놓고, 샘플링 수는 나이퀴스트(Nyquist) 이론에 따라 8×10^8 개로 하였다. 그리고 반

송 주파수 f_{1B} 와 f_{2B} 는 각각 80 MHz와 40 MHz로 고정하였으며, 스피커의 신호 주파수에 해당하는 f_{s1} 과 f_{s2} 는 각각 9 kHz와 5 kHz로 설정하여 사인 함수로 구동하였다.

Fig. 1 (a)에서 보듯이 f_{2B} 에 대응하는 스펙트럼의 크기가 f_{1B} 에 해당하는 스펙트럼이 크기보다 2배 크며,

f_{1B} 와 f_{2B} 에 붙어서 f_{S1} 과 f_{S2} 의 스펙트럼은 거의 중첩되어 있다. Fig. 1 (b)와 (c)는 Fig. 1 (a)에서 $f_{1B}= 80$ MHz와 $f_{2B}= 40$ MHz를 각각 중심주파수로 놓고 $f_{S1}= 9$ kHz와 $f_{S2}= 5$ kHz가 보이도록 확대한 것으로 스피커 1과 2의 진동 주파수를 갖는 물체빔 $E1$ 와 $E2$ 를 기준빔 $E0$ 에 중첩시키는 간섭에서 서로 다른 두 스피커의 진동 주파수를 동시에 신호간섭없이 측정할 수 있음을 알 수 있다. 특히 Fig. 1 (b)에서는 $f_{S1}= 9$ kHz와 $f_{S2}= 5$ kHz의 스펙트럼이 $f_{2B}= 40$ MHz의 좌우에 모두 나타나는데, 이는 식 (5)에서 첫 번째 항에서 $n = \pm 1$ 의 경우에 대한 스펙트럼과 네 번째 항의 합에서 $n = 0$ 및 $m = \pm 1$ 의 경우에 대한 스펙트럼을 보여주는 것이다. 그리고 다른 n, m 의 항들은 그 크기인 베셀 함수의 곱의 값이 급속도로 작아지므로 이에 대응하는 스펙트럼도 급속도로 작아지면서 관찰이 안된다. 그리고 식 (5)의 세 번째 항은 변조주파수가 $f_{1B}+f_{2B}$ 이므로 각각의 물체빔의 단독 주파수보다 더 높은 주파수대에서만 관찰이 된다. Fig. 1 (c)의 스펙트럼에서는 $f_{S1}= 9$ kHz의 스펙트럼만이 $f_{1B}= 80$ MHz의 좌우에 모두 관찰되는데 이는 식 (5)의 두 번째 항만이 기여하기 때문이다. 그리고 Fig. 1 (b)의 $f_{2B}= 40$ MHz와 $f_{2B} \pm f_{S2}= 40 \text{ MHz} \pm 5 \text{ kHz}$ 의 스펙트럼 세기들이 Fig. 1 (c)의 $f_{1B}= 80$ MHz와 $f_{1B} \pm f_{S1}= 80 \text{ MHz} \pm 9 \text{ kHz}$ 의 스펙트럼 세기들보다 2 배 정도 크다. 이 이유는 f_{2B} 와 $f_{2B} \pm f_{S2}$ 의 스펙트럼 세기들은 식 (5)에서 첫 번째 항과 네 번째 항의 해당 차수에 대한 합으로 나타나지만, f_{1B} 와 $f_{1B} \pm f_{S1}$ 의 스펙트럼 세기들은 오직 두 번째 항의 해당 차수만이 기여하기 때문이다.

3. AP/DPAOMS LDV의 구성 및 실험방법

Fig. 2는 AP/DPAOMS LDV의 광학부 구성도이다. 중심 파장이 532 nm이고, 출력이 250 mW이며, p 편광된 다이오드 레이저(II-VI SUWTECT, DPGL-2200)에서 나온 빔을 빔 분할기(Beam Splitter) (Melles Griot, 03 BSC 003) BS 1에서 반사한 빔은 ND 필터(Neutral Density Filter: ND filter) (Melles Griot, 03 FSG 013)와 거울(Mirror) 1을 거쳐서 거울 2에서 반사하여 다시 거울 1, ND 필터, BS 1, 아이리스(Iris) 2, BS 4, 렌즈(lens) 3으로 (1)식의 기준빔(Reference

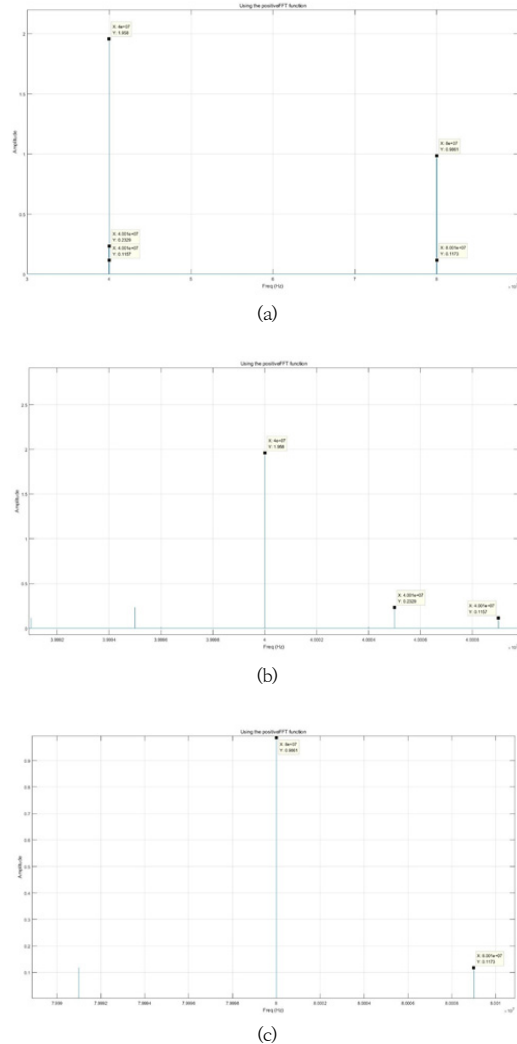


Fig. 1. Computer simulated spectrum results of interferometric signals of a heterodyne interferometer with a reference beam and two different object beams obtained by fast Fourier transform(FFT) in MATLAB: the FFT spectrum (a) simultaneously included $f_{1B}= 80$ MHz and $f_{2B}= 40$ MHz and the expanded FFT spectrums (b) near $f_{2B}= 40$ MHz and (c) $f_{1B}= 80$ MHz, respectively.

Beam) $E0$ 이 되어서 광 검출기(Detector)로 들어간다. 이때 모든 BS는 5:5로 빔의 복사조도를 나누며, ND 필터는 광 검출기로 들어가는 기준빔의 세기를 줄여서 물체빔(Object Beam) 1, 2인 (2)식의 $E1$ 과 (3)식의 $E2$ 복사조도와 비슷하게 만들어서 간섭광의 가시도를 커지도록 한다. 그리고 아이리스(Iris)는 간섭을 하는 빔만을

통과시키고 다른 잡광을 차폐한다. 즉 BS 1에서 통과한 빔은 브라그(Bragg) 주파수가 $f_B = 40$ MHz인 AOM(ISOMET, M1201E-SF40-1.7V)을 거쳐서 이 빔의 고차 회절광이 발생한다. 이 빔의 0차 빔은 아이리스 1로 차폐되어서 1차 회절광만이 아이리스 1의 구멍을 통과하여 BS 2에서 반사한 후, 렌즈 1로 스피커 1에 설치한 가벼운 거울로 입사한다. 주파수가 f_{S1} 으로 구동되는 스피커 1에서 반사한 1차 회절광은 다시 렌즈 1, BS 2, 아이리스 1을 통과하여 AOM을 다시 통과하여 2번 회절함으로써 주파수가 $f_{1B} = 2f_B = 80$ MHz 만큼 반송 주파수로 변조된다. 그리고 이 회절광은 BS 1에서 반사하여 아이리스 2, BS4를 통과한 후 렌즈 3에 의해서 물체 빔 $E1$ 으로서 Si PIN 광 검출기(New Focus, 1621)로 들어간다. 이 광 검출기는 가시광 영역에서 작동하며 Rise Time 이 1 ns이다. 이와 동시에 BS 2를 통과한 회절광은 거울 3에서 반사한 후 BS 3을 통과하여 렌즈 2로 스피커 2에 붙은 작은 거울로 입사한다. 이 빔은 주파수가 f_{S2} 로 구동되는 스피커 2에서 반사하여 BS 3과 BS 4에서 반사되어 렌즈 3으로 $E2$ 과 $E1$ 을 검출하는 동일한 광 검출기로 들어가는데, 이 물체빔 2의 반송 주파수는 $f_{2B} = f_B = 40$ MHz이다. 여기에서 사용한 AOM은 $f_B = 40$ MHz의 라디오 주파수(Radio Frequency: RF)의 AOM 드라이버(ISOMET, 531C-2)로 구동하고 이 AOM 드라이버는 함수 발생기(WAVEREK, Model 8)와 연결하여 사용하였다. 스피커(Speaker)1, 2는 1 μ Hz ~ 30 MHz까지 주파수를 바꿀 수 있는 함수 발생기(RIGOL, DG1032Z)를 이용하여 작동시켰다. 여기에서 이 간섭계는 간섭 조건에 민감하므로 거울 1과 거울 2를 이용하여 광경로차를 조절함으로써 $E0$ 와 $E1$, $E0$ 와 $E2$ 사이에 간섭이 잘 일어나도록 한다. 또한 3개의 빔의 복사조도가 거의 비슷하게 되도록 물체빔 2개는 BS를 5번 통과하게 배치하였으며, 기준빔은 앞서 언급한 바와 ND 필터로 복사조도를 조절하였다. 다만 물체빔 $E1$ 이 $E2$ 보다 AOM을 한번 더 통과하지만 AOM의 회절효율이 90%이므로 두 물체빔의 복사조도는 거의 비슷하다. Fig. 2의 구성도에 따라 광학적 배치를 한 실험장지도가 Fig. 3으로 적색선은 레이저 광의 경로를 나타낸다. 그리고 Fig. 3에서 광 검출기에서 측정된 스펙트럼은 스펙트럼 분석기(Agilent, E4403B)로 측정하며, 이 스펙트럼 분석기의 측정 가능한 주파수 범위는 9 kHz ~ 3 GHz이다.

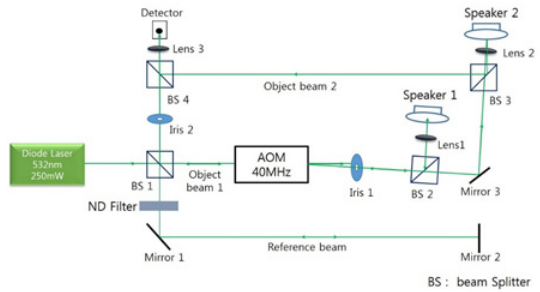


Fig. 2. Experimental set-up of laser Doppler vibrometer of 3 beams (object beams 1 and 2, reference beam) heterodyne interferometer for the simultaneous measurement of two vibration frequencies of speaker1 and 2.

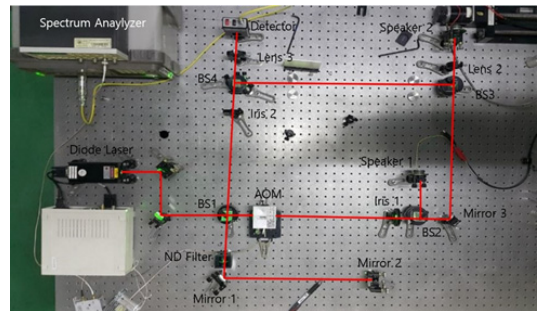


Fig. 3. Photo of experimental Set-up of LDV with Double-Pass Acousto-optic Modulator System.

4. AP/DPAOMS LDV의 실험결과

Fig. 4는 Fig. 2, 3에서 스피커1, 렌즈1, BS2의 구조를 그대로 이동시켜서 BS2를 BS3과 BS4 사이에 적절히 위치시킴으로써 AP/DPAOMS의 기능이 없이 두 지점의 주파수를 측정하는 LDV를 구성하였을 때, 측정된 스펙트럼을 보여주는 사진이다. 변조주파수는 AOM의 40 MHz이며, 스피커1, 2의 두 주파수 f_{S1} 과 f_{S2} 의 주파수는 각각 5 kHz와 5.4 kHz로 발진시켰을 때 광 검출기에 측정된 40 MHz의 주파수 근처에서 생기는 f_{S1} 과 f_{S2} 의 조화주파수들에 의한 복잡한 간섭 주파수가 f_{S1} 근처에서 보인다. 그러므로 유사한 두 스피커의 주파수를 상호 구별하기가 쉽지 않으며, 두 스피커의 주파수 차이를 측정했다고 하여도 어느 주파수가 스피커 1인지를 구별하는 것은 불가능하다. 그러므로 주파수가 유사한 두 스피커의 주파수를 정확하게 구별하여 측정하려면 본 논문

에서 제시한 1개의 AOM과 1개의 광 검출기만을 사용하는 AP/DPAOMS LDV가 구조적으로 단순하며 비용적 측면에서도 저렴하게 구성한 새로운 LDV가 될 수 있다.

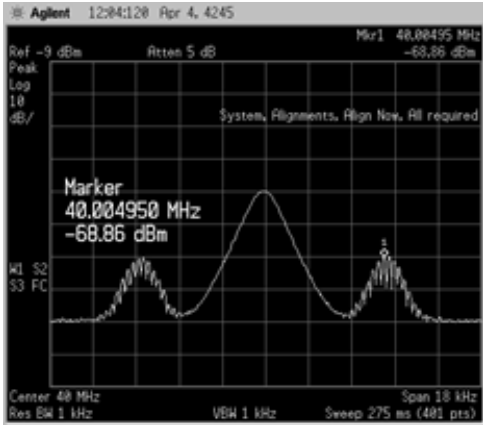
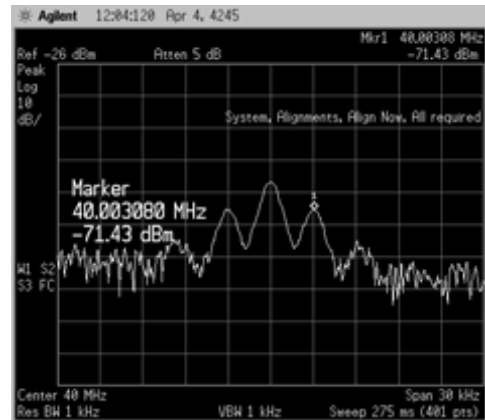


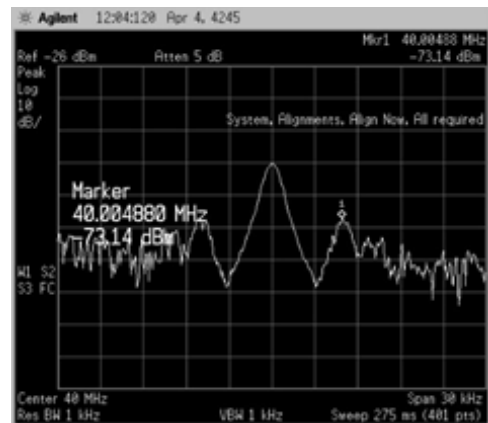
Fig. 4. Spectrum Signal : Speaker 1: 5 KHz, Speaker 2: 5.4 KHz

Fig. 5 (a)와 (b)는 Fig. 2와 3처럼 AP/DPAOMS LDV에서 $f_{1B} = 40$ MHz에 대해서 스피커 1의 주파수를 $f_{S1} = 2$ kHz로 고정 후 스피커 2의 주파수 f_{S2} 를 3 kHz와 5 kHz로 구동할 경우, 광 검출기의 신호의 주파수를 스펙트럼 분석기로 분석한 각각의 결과이다. 이 결과 40 MHz의 반송 주파수에서 스피커 2의 주파수와는 무관한 스피커 1의 주파수가 선명하게 잘 검출되는 것을 확인 할 수 있다. 이 결과는 3개의 간섭광에 대한 헤테로 다인 간섭의 이론을 시뮬레이션한 Fig. 1 (a)와 (b)의 반송 주파수가 40 MHz에 대한 결과와 일치하지만, 실험에서는 다이오드 레이저, AOM, 스피커 2의 주파수 밴드폭이 존재하므로 시뮬레이션에서 직선으로 나온 스펙트럼이 주파수 밴드폭을 갖는 신호 주파수로 검출되는 점이 다르다. 그러므로 그림 4에서 발생한 두 신호 주파수의 간섭 및 두 신호주파수를 구별하지 못하는 문제점들이 해결됨을 알 수 있다.

Fig. 6 (a)와 (b)는 Fig. 5와는 다르게 AP/DPAOMS LDV에서 $f_{2B} = 80$ MHz에 대해서 스피커 2의 주파수를 $f_{S2} = 2$ kHz로 고정 후 스피커 1의 주파수 f_{S1} 를 3 kHz와 5 kHz로 인가할 경우, 광 검출기의 신호의 주파수를 스펙트럼 분석기로 분석한 각각의 결과이다. 이 결과 서로 80 MHz의 반송 주파수에서 스피커 2의 주파수와는 무관한 스피커 1의 주파수가 선명하게 잘 검출되는 것을 확인 할 수 있다. 이 결과도 스펙트럼이 밴드폭을



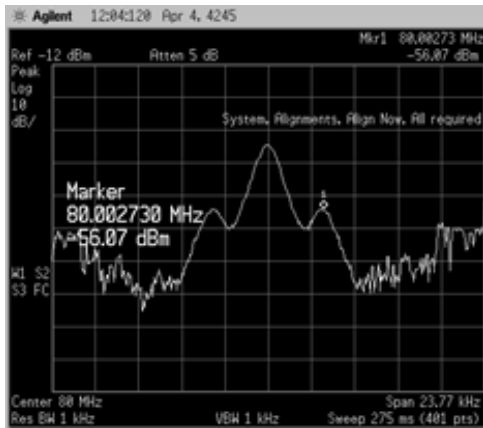
(a)



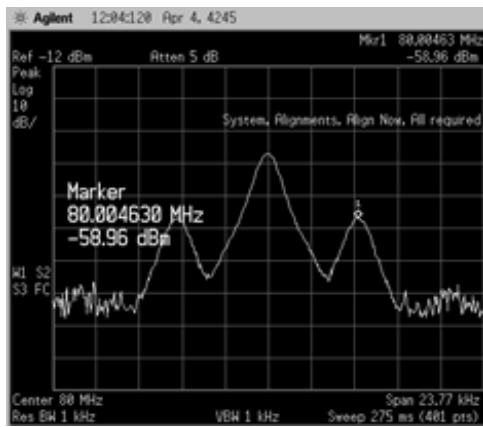
(b)

Fig. 5. Spectrum Signal : (a) Speaker 1: 2 KHz, Speaker 2: 3 KHz, (b) Speaker 1: 2 KHz, Speaker 2: 5 KHz

가지고 퍼지는 것을 제외하면 Fig. 1 (a)와 (c)의 80 MHz의 반송 주파수에 대한 결과와 잘 일치한다. 그러므로 Fig. 5와 더불어 Fig. 4에서 발생한 두 신호 주파수의 간섭 및 두 신호주파수를 구별하지 못하는 문제점들이 80 MHz의 반송 주파수에서도 잘 해결됨을 알 수 있다. 다만 Fig. 5와는 달리 Fig. 6에서는 측정된 신호 주파수가 인가된 스피커 1의 주파수와 300 Hz 근처의 차이가 발생하였다. 이것은 스피커 1의 거울에서 반사되어 AOM을 왕복으로 거치는 빛이 이 거울이 입사 빔에 대해서 수직이 아닌 반사 빔이 AOM에서 이중으로 통과함으로써 전체적으로 신호 주파수에 오차가 발생한 것으로 추정이 된다. Fig. 5의 경우에도 약 80 Hz 정도의 측정 오차가 생기는데, Fig. 6은 이것의 2배 이상의 오차가 발생하는 것으로 보아서 이러한 분석이 가능하다고 본다.



(a)



(b)

Fig. 6. Spectrum Signal : (a) Speaker 1: 3 KHz, Speaker 2: 2 KHz (b) Speaker 1: 5 KHz, Speaker 2: 2 KHz

Fig. 7의 검정색 원형 데이터는 Fig. 5의 실험을 확대하여 f_{s2} 를 2 kHz로 고정하고 f_{s1} 을 2 kHz에서 8 kHz까지 2 kHz 간격으로 바꾸었을 때, AP/DPAOMS LDV를 통하여 측정된 f_{s1} 을 스펙트럼 분석기로 측정된 결과이며, 직선은 이 값들을 직선으로 피팅한 그래프로 인가한 주파수를 x 축으로 측정된 주파수를 y 축으로 나타낼 경우 $y = 0.9557x + 0.1643$ 이다. 마찬가지로 Fig. 7의 적색 삼각형 데이터는 Fig. 6의 실험을 확대하여 f_{s1} 을 2 kHz로 고정하고 f_{s2} 를 2 kHz에서 8 kHz까지 2 kHz 간격으로 바꾸었을 때, AP/DPAOMS LDV를 통하여 측정된 f_{s2} 를 스펙트럼 분석기로 측정된 결과이며, 직선은 이 값들을 직선으로 피팅한 그래프로 $y = 1.012x - 0.3793$ 이다. 이론적으로는 이 두 가지 경우 모두 $y = x$ 그래프

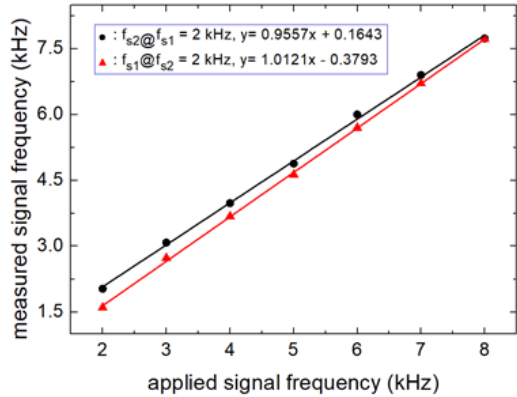


Fig. 7. Spectrum Signal (a) Speaker 1: 2 KHz, Speaker 2: 3 KHz (b) Speaker 1: 2 KHz, Speaker 2: 4 KHz (c) Speaker 1: 2 KHz, Speaker 2: 5 KHz (d) Speaker 1: 2 KHz, Speaker 2: 6 KHz (e) Speaker 1: 2 KHz, Speaker 2: 7 KHz (f) Speaker 1: 5.5 KHz, Speaker 2: 5 KHz (g) Speaker 1: 6.5 KHz, Speaker 2: 5 KHz

로 피팅되어야 하지만, 스펙트럼 분석기의 신호 주파수를 수동으로 측정된 결과와 AP/DPAOMS LDV 실험을 위하여 설치된 스피커의 거울에서 반사한 빔이 다른 빔과 다중 간섭하여 집음을 발생하는 것을 막기 위하여 수직으로 입사하지 않았기 때문에 발생한 실험적 오차와 실험 장치의 자체 진동을 보정하지 않은 주파수 오차 [7,8]가 누적된 결과이다. 그러나 이러한 점들은 보다 정밀하게 실험장치를 구성하고 자체 진동을 보정하는 시스템을 도입한 후, 스펙트럼 분석기 없이 전자회로나 소프트웨어로 신호를 처리하도록 신호처리계를 구성하면 잡음 제거 및 측정 주파수를 자동으로 처리되면서 이러한 실험 오차가 줄어들 것으로 예상된다. 이와 더불어 실제로 AP/DPAOMS LDV를 실제의 물체에 적용할 경우, 두 곳에서 산란된 빛 중에서 수직으로 입사하는 광만을 측정하도록 광 검출기의 시야각을 작게 한 렌즈 채택하고 광 검출기를 민감도가 훨씬 좋은 ADP(Avalanche Photo Diode) 등과 같은 고감도의 광 검출기를 사용한다면 이러한 오차를 보다 더 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

광음향 변조기에 대한 이중 경로에서 발생한 서로 다른 2개의 반송 주파수를 갖는 물체빔 2개를 발생시키는 한 대의 광음향 변조기와 하나의 광 검출기만을 사용하

여 서로 다른 위치에서 발생하는 진동수를 동시에 측정하는 3개 빔 이중 간섭계 방식의 레이저 도플러 진동계를 제안하고 이를 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 가능성을 확인하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여-광음향 변조기를 한 번 통과하여 40 MHz의 반송주파수를 갖는 물체빔과 이중 경로로 동일하여 생긴 80 MHz의 반송주파수를 갖는 물체빔이 다른 두 지점을 각각 조명하였을 때, 두 측정 지점에서 반사한 서로 다른 두 물체빔과 반송주파수가 없는 하나의 기준빔이 광 검출기에 간섭한 간섭광으로 측정된 두 스피커의 진동주파수 f_{1A} 와 f_{2A} 가 2 kHz부터 8 kHz까지 반송주파수 f_{1B} 와 f_{2B} 근처에서 동시에 명확하게 측정되는 것을 확인하였다. 앞으로 자체 진동을 보정하는 시스템을 채택하고 광 검출기의 신호를 전자회로나 소프트웨어로 처리하는 신호처리계를 구성하면 잡음 제거 및 측정 주파수를 자동으로 처리되면서 이 오차는 상당히 줄어들 것으로 예상된다. 그리고 AP/DPAOMS LDV를 실제의 물체에 적용할 경우에 두 측정지점에서 산란된 빛 중에서 수직으로 입사하는 광만을 측정하도록 광 검출기의 시야각을 작게 한 렌즈 채택하고 광 검출기를 민감도가 훨씬 좋은 ADP(Avalanche Photo Diode) 등과 같은 고감도의 광 검출기를 사용하면 더욱 더 성능이 좋은 LDV가 되리라 예상된다.

References

- [1] Y. Yeh, H. Z. Cummins, "Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer", *Applied Physics Letters*, Vol.4, No.10, pp.176-178, 1964.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1753925>
- [2] D. K. Kim, H. J. Song, K. H. Park, "Three-dimensional vibration measurement algorithm using one laser scanning vibrometer", *Proceedings of The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Spring Meeting 2012*, pp.935-939, 2012.
- [3] S. H. Kim, J. H. Ko, H. S. Kim "Development of High Resolution Laser Doppler Vibrometer", *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, Vol.49, No.2, pp.125-131, 2000.
- [4] K. H. Park, J. E. Choi, J. P. La, S. M. Wang, Y. S. Kyoung, K. S. Kim, "A Continuous Scanning Laser Doppler Vibrometer for Mode Shape Analysis", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.27, No.5, pp.734-741, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.3795/ksme-a.2003.27.5.734>
- [5] N. Apetre, M. Ruzzene, L. J. Jacobs, J. Qu, "Measurement of the Rayleigh wave polarization using 1D Laser vibrometry", *NDT&E International*, Vol.44, No.3, pp.247-253, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.07.007>
- [6] E. A. Donley, T. P. Heavner, F. Levi, b M. O. Tataw, S. R. Jefferts "Double-pass acousto-optic modulator system" *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.76, No.6, pp.063112-1-063112-6, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1930095>
- [7] Y. J. Lee, H. S. Kim, "Laser Doppler Vibrometer with self vibration compensation", *Electro-physics & Application Society Fall Conference and General Meeting*, pp.1838-1840, 2001.
- [8] J. S. Lee, T. G. Chang, J. H. Kim, H. S. Kim, M. S. Kang, "A laser Doppler Vibrometer Featured with the In-housed Mechanism for Adaptive Compensation of Body Vibration", *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, Vol.50, pp.392-399, 2001.
- [9] J. H. Yang, "A study on the design of an optical fiber laser doppler system for vibration measurements", Master's thesis, Suwon University, 2000.
- [10] Junhee Kim, "Structural Parameter Estimation using Remote Laser Displacement Measurement System and Subspace System Identification Method", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.15, No.1, pp.14-21, 2015.
- [11] Jin Taek Jun, Yoon Seok Kang, Woo Tae Jeong, Soo Hyung Lee, Jeong Geun Park, *2021 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, KSR2014S005, 2014.
- [12] Junhee Kim, Toon-Soo Shin, Kyung-Won Min, "Measurement System of Dynamic Liquid Motion using a Laser Doppler Vibrometer and Galvanometer Scanner", *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.31, No.5, pp.227-234, 2018'
DOI: <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2018.31.5.227>
- [13] Jung-Ryul Lee, "High-speed scanning of laser doppler vibrometer for rotating object vibration and angular scan pulse-echo ultrasonic sensing", PhD thesis, KAIST, 2019.
- [14] A. Yariv, "Quantum electronics" 3rd ed., JOHN WILEY & SONS, Singapore, Singapore, 1989, pp.313-314.

오 현 석(Hyun Seok Oh)

[정회원]



- 2018년 2월 : 한남대학교 무인시스템공학 대학원 광메카트로닉스 전공(공학석사)
- 2018년 5월 ~ 현재 : 에이앤아이 미래기술연구소 광계측기파트

<관심분야>

응용광학, 광계측기

정 연 흥(Youn Hong Jeong)

[정회원]



- 2009년 8월 : 한남대학교 대학원 물리학과 응용광학전공 (이학박사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 국제대학교 안경광학과 조교수

<관심분야>

응용광학, 안경광학

조 재 흥(Jae Heung Jo)

[정회원]



- 1984년 2월 : KAIST 물리학과 대학원 응용광학전공 (이학석사)
- 1987년 2월 : KAIST 물리학과 대학원 응용광학전공 (이학박사)
- 1987년 3월 ~ 1992년 2월 : 한국 표준과학연구원 선임연구원
- 1992년 3월 ~ 현재 : 한남대학교 컴퓨터통신무인기술학과 정교수

<관심분야>

응용광학, 정보통신