

레이저 도플러 진동계를 이용한 진동변위와 주파수 측정방법 연구

김성훈* , 김호성
 중앙대학교 전기공학과

A Study on the method for the measurement of vibrating amplitude and frequency with Laser Doppler Vibrometer

Seonghoon Kim* , Hoseong Kim
 Dept. of Electrical Eng., Chung Ang Univ.

Abstract - A Laser Doppler Vibrometer (LDV) was developed using He-Ne laser as a light source. The heterodyne method was employed and its output signal was digitally processed with a μ -processor and the result was displayed with LCD. The frequency shifted object beam (40 MHz) by a Bragg cell was focused on the surface of the moving target and the Doppler shifted reflected beam was recombined with reference beam at the fast photodetector to produce frequency modulated signal centered at 40 MHz. The signal from the detector was amplified and downconverted to intermediate frequency centered at 1 MHz after mixing process. The voltage output that was proportional to the velocity of the moving surface was obtained using PLL. With the same method, the fringe pattern signal of the moving surface is obtained. This fringe pattern signal is converted to TTL signal with ZCD (zero-crossing detector) and then counted to calculate the displacement due to the vibration, which is displayed with LCD. This LDV can be used to measure the resonant frequency of the electric equipments such as circuit breakers and transformers, of which resonant frequencies are changed when they are damaged.

1. 서 론

최근 들어 레이저 도플러 진동계가 많이 사용되고 있는데 이는 소형 경량화 되어 가는 첨단제품의 진동을 비접촉으로 측정할 수 있기 때문이다. 레이저 도플러 진동계는 비접촉식이며 보정이 필요 없고 속도에 대해 거의 선형적인 출력을 얻을 수 있으며 측정범위가 넓다는 여러 가지 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인하여 현재 소형, 경량화 되어 가는 산업제품의 측정 및 평가에 레이저 도플러 진동계는 더욱 많이 사용될 것이며 특히 최근 들어 미래기술로 주목을 받고 있는 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 분야에서는 그 수요가 급격히 증가하리라 예상된다. 또한 대용량 전력계통의 고장진단 분야에서도 LDV(Laser Doppler Vibrometer)의 응용이 확장되어가고 있는데 특히 애자나 송전선, 변압기, 차단기 등의 고장진단에 사용될 전망이다. 이러한 전력 기기나 부품 등은 열화됨에 따라 크랙발생에 의해 기계적 특성이 바뀌어 고유 진동수가 변하게 되며 이러한 고유 진동수의 변화를 측정하면 사고 발생 전에 열화된 부품을 발견할 수 있다. 애자의 경우 건전품의 고유 진동수는 2 ~ 3 kHz 이며 크랙이 발생한 애자의 고유 진동수는 건전품에 비교하여 100 ~ 300 Hz 정도 저하되며 이러한 변화는 LDV로 충분히

히 측정할 수 있다. [1]
 국내에서 시행된 LDV 연구 [2]에서는 그 신호처리 방법에 대한 연구가 되어있지 않아 본 연구에서는 레이저 도플러 진동계의 제작 및 신호처리 방법에 대해 서술하고자 한다. 광원으로는 4mW 출력의 He-Ne 레이저를 사용했으며 운동방향을 구별하기 위해 object beam의 주파수를 Bragg cell을 이용하여 40MHz 천이 시켰다. 주파수 천이된 object beam은 진동물체 표면에서 반사되고 이 반사된 빛은 reference beam과 합쳐진 후 고속 광 디텍터에 입사된다. 광 디텍터의 출력은 증폭된 후 주파수 변환기 그리고 PLL 복조기를 거쳐 속도에 비례한 신호로 변환되어 출력된다.

2. 본 론

2.1 LDV의 이론

그림 1의 LDV의 개념도와 같이, He-Ne laser beam은 beam splitter 1에 의해 reference beam 과 object beam으로 각기 나뉘어진다. Bragg cell을 통과한 object beam은 40MHz의 주파수 천이가 일어나게 되며 이 object beam은 beam splitter 2를 지나 focusing 렌즈에 의해 측정하려는 물체에 입사된다. Object beam은 진동하는 물체, 본 실험에서는 audio generator에 의해 구동되는 스피커에 의해 반사되고 다시 beam splitter 2, 3을 거쳐 reference beam과 합쳐지게 된다. 렌즈는 반사된 beam의 light scattering losses를 최소화하고, 반사된 beam의 wavefront deformation을 최소화하기 위해 사용되었다. 이렇게 합쳐진 두 빛은 간섭을 일으키게 되고 이 빛은 응답속도가 빠른 PIN-photodetector를 통해 광 신호로부터 전기적인 신호로 바뀌어진다.

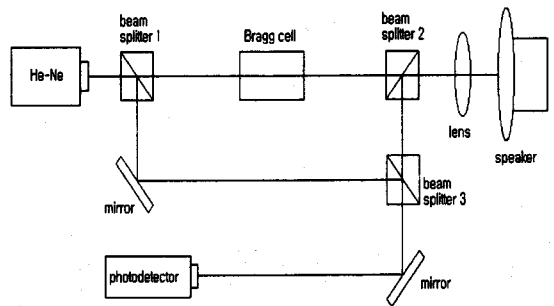


그림 1 : LDV의 개념도

Reference beam E_1 과 object beam E_2 를 다음 식과 같이 표현하고,

$$E_1(t) = E_1 \exp(i\omega t) \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_2(t) = E_2 \exp[i(\omega + \omega_B)t + \delta(t)] \quad (2)$$

ω : laser beam frequency

ω_B : Bragg cell에 의한 frequency shift

$\delta(t)$: 진동에 의한 위상 변화

audio generator에 의해 구동되는 스피커의 변위 $S(t)$ 를 다음과 같이 표현하면

$$S(t) = A \cos \omega_S t \quad (3)$$

A : 진폭

ω_S : audio generator frequency

이때의 진동에 의한 위상변화는 다음과 같다.

$$\delta(t) = \frac{4\pi}{\lambda} S(t) \quad (4)$$

Photodetector에 입사되는 빛은 $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_1(t) + \mathbf{E}_2(t)$ 이고, 이 경우 Photodetector의 출력전류 $I(t)$ 는 입사되는 빛의 intensity $I = [\mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{E}(t)]/2$ 에 비례하므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I(t) &\propto E_1^2/2 + E_2^2/2 + E_1 E_2 \cos[(\omega - \omega_B)t + \delta(t)] \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(\omega - \omega_B)t + \delta(t)] \\ \therefore I(t) &= I_0 [1 + \cos(\omega_B t + \delta(t))] \quad (5) \end{aligned}$$

으로 표현되며, 식(4)를 식(5)에 대입하고 직류성분을 제외한 교류성분만을 측정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I(t) = I_0 \cos \left(\omega_B t + \frac{4\pi S(t)}{\lambda} \right) \quad (6)$$

시간 t 에서의 signal 주파수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\omega_B t + \frac{4\pi S(t)}{\lambda} \right) \quad (7) \\ &= \omega_B + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial S(t)}{\partial t} \\ &= \omega_B + \frac{4\pi}{\lambda} v(t) \quad (8) \end{aligned}$$

위 식에서 각속도를 주파수로 나타내면

$$f = f_B + \frac{2}{\lambda} v(t) \quad (9)$$

와 같이되고, PLL의 출력전압은 입력 주파수에 비례하므로 비례상수 K 를 사용해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(t) = K \left(f_B + \frac{2}{\lambda} v(t) \right) \quad (10)$$

이때 교류성분만을 취하면 다음과 같고

$$V_{AC} = K \frac{2}{\lambda} v(t) \quad (11)$$

위 식에서 speaker의 속도는

$$v(t) = \frac{\lambda}{2K} V_{AC}(t) \quad (12)$$

과 같이되고, 이를 적분하면 변위는 다음과 같이된다.

$$S(t) = \int v(t) dt \quad (13)$$

식(8)을 보면 signal 주파수는 ω_B 에 대하여 물체의 속도 $v(t)$ 에 의해 $\frac{4\pi}{\lambda} v(t)$ 만큼 주파수 천이가 일어났음을 알 수 있다. 이렇게 다가오는 물체나 멀어지는 물체에 의해 빛이 반사되어 나올 때에 주파수 천이가 일어나는 현상을 도플러 효과라 한다[3][4].

도플러 주파수에서 변위를 구하면,

$$\Delta f_D = \frac{2}{\lambda} v = \frac{2}{\lambda} \frac{S}{t} \text{ 이고,}$$

$$\therefore S = \frac{\lambda}{2} \Delta f_D t = \frac{\lambda}{2} N \quad (14) \text{ 와 같이}$$

구할 수 있다.[3] 여기서 Δf_D 는 도플러 주파수, λ 는 레이저의 파장, S 는 스피커 진동의 변위, t 는 스피커 진동의 주기, N 은 주기 t 동안의 fringe 수이다.

이상에서 식(8)에 의해 $\omega(t)$ 를 tracking 함으로써 물체의 속도를 측정할 수 있고, 속도 $v(t)$ 를 시간에 따라 적분함으로써 변위 $S(t)$ 를 구하거나 fringe counting에 의해 변위를 구할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 heterodyne vibrometer는 2개의 다른 주파수를 갖는 wave를 사용하는 방법이며, homodyne method에 비해 다소 복잡한 구조이기는 하나 homodyne method에 비해 식(8)에서와 같이 $v(t)$ 의 방향, 즉 진동 방향의 구별이 용이하다. 또한 간섭광의 크기를 측정하는 것이 아니라 주파수를 측정하므로 잡음에 강하고 높은 S/N 비를 얻을 수 있어 작은 반사광으로도 높은 측정정밀도를 얻을 수 있다.[4][5] 본 연구에서는 다중 주파수 레이저를 사용하는 대신에 단일 주파수 레이저를 사용하였고 대신 Bragg cell을 이용하여 object beam을 40MHz 주파수 천이 하여 실험을 하였다

2.2 LDV의 구성

2.2.1 광학부

본 연구에서 개발한 LDV의 광학부 구성도는 그림 1과 같다. 그림 1에서 Photodetector로 입사되는 object beam 과 reference beam의 간섭경로를 가능한 한 길게 하면, 즉 광 경로차를 가능한 한 길게 하면 측정신호를 깨끗하고 크게 할 수 있다. 구성도에서처럼 object beam의 경로는 Bragg cell과 렌즈를 통과하고 물체에 반사되는 등 복잡한 경로를 갖게 되어 경로조정이 용이하지 않으나, reference beam은 왼쪽의 mirror만을 조정함으로써 detector에 입사하는 beam을 조절할 수 있기 때문에 그림 1과 같이 광학장치를 구성하는 것이 두 beam의 간섭경로를 쉽게 일치하도록 조절할 수 있다. 먼저 조정이 어려운 object beam을 물체에 반사시킨 후에 reference beam을 조정하여 경로를 일치하게 하였다[3][4].

2.2.2 신호처리부

다음 그림 2는 광학부에서 측정된 신호의 처리단계를 나타낸 블록도 이다.

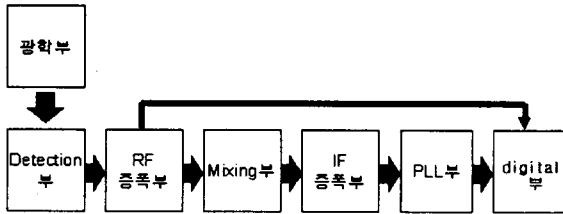


그림 2 신호처리부의 블록도

광학부에서 측정된 신호를 처리하는 단계는 다음과 같다.

Detection부는 광 신호를 40MHz를 중심 주파수로 하고 Doppler천이에 의해 FM변조된 전기적 신호로 바꾸는 회로이다. 디텍터로는 Hamamatsu사의 PIN photodetector를 photo-conductive mode로 사용하였고, 증폭기로는 AD849를 사용하였으며 40MHz에서 30dB의 증폭률을 가진다. RF증폭부에서는 Detection부의 출력을 40dB 정도 증폭하는 회로이며, Philips 사의 NE5204A 증폭기를 사용하여 2단 증폭하였다. Mixing부는 중심주파수가 40MHz인 전기적 신호를 중심주파수가 1MHz인 IF신호로 주파수를 낮추는 회로이며, 39MHz의 출력을 갖는 crystal 발진기와 AD834 곱셈기를 사용하였다. IF증폭부에서는 Mixer의 출력을 증폭하고 고주파를 filtering하는 회로이며, 증폭기로써 AD849와 lowpass filter를 사용하였다. PLL부는 IF신호에서 속도에 비례하는 Doppler shift 주파수를 검출하는 회로이며 NE564 PLL chip을 사용하였고, 출력은 VCO free running 주파수 1MHz와 IF신호 주파수와의 차이에 비례하는 전압이다. digital부에서는 fringe pattern 신호를 TTL 신호로 변환하여 counting하고 변위를 구한다.

2.2.3 fringe counting 부

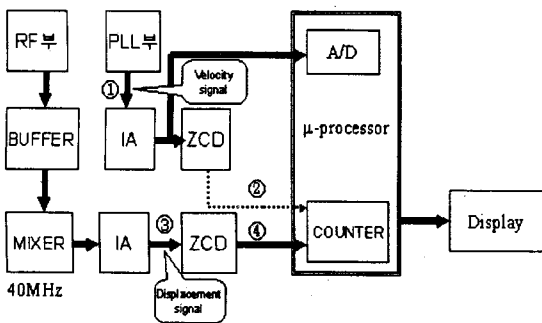


그림 3: digital부-fringe counting부의 블록도

그림 3은 앞의 그림 2의 신호처리부 블록도에 나타난 digital부에 해당하는 부분으로 fringe counting 회로의 블록도 이다.

PLL부의 출력신호인 속도신호를 zero-crossing하여 counting enable 신호를 만들고 RF부의 fringe pattern 신호를 zero-crossing 하여 counter 입력신호로 하였다. μ -processor에서 counter의 출력을 이용하여 변위를 구하고 LCD로 display 되도록 하였다.

2.3 실험결과 및 분석

다음은 스피커의 입력주파수를 100Hz로 고정하여 실험한 결과이다.

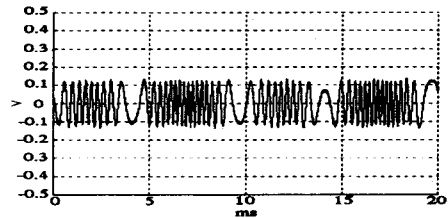


그림 4 : RF증폭부 출력 파형

그림 4는 RF증폭부의 출력을 msec 시간 축에서 오실로스코프로 관측한 결과이다. msec 시간 축에서 측정하면 그림 4와 같이 fringe counting을 할 수 있는 전형적인 간섭패턴을 볼 수 있었다. 그러나 같은 출력을 nsec 시간 축에서 측정하면 40MHz 정도의 주파수를 갖는 신호를 볼 수 있으며, 그 주파수는 물체의 속도에 비례하여 변함을 관측할 수 있었다. 또한 RF증폭부 출력을 주파수분석기로 측정하면 그림 5와 같이 중심주파수가 40MHz이고 변조폭이 물체의 속도에 비례하는 FM변조된 신호를 관측할 수 있었다.

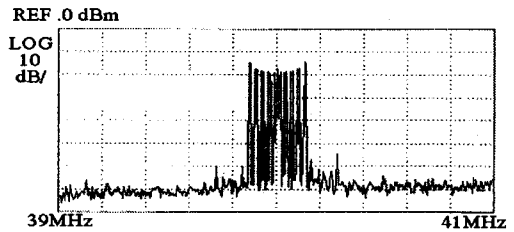


그림 5 : RF출력 신호의 스펙트럼

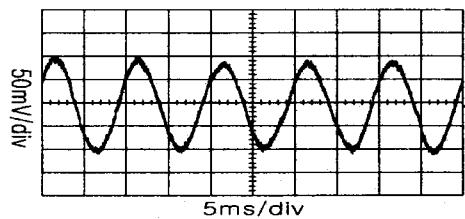


그림 6 : 속도에 비례하는 PLL 출력 신호

그림 6은 PLL출력전압 파형으로 그 주파수는 스피커의 입력주파수와 같은 100Hz임을 알 수 있으며 스피커의 입력신호의 크기를 증감하면 출력전압의 크기도 비례하여 증감함을 확인할 수 있었다.

2.3.1 변위 및 주파수 측정 방법

변위를 구하는 방법에는 속도의 적분에 의한 방법과 fringe counting에 의한 방법이 있다.

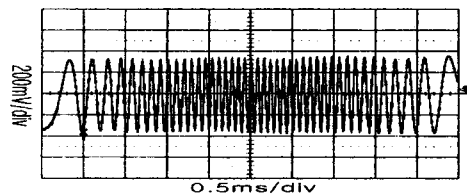


그림 7 : RF 증폭부 출력 신호 - fringe pattern 신호

이 두 가지 방법을 비교해 보면, 속도의 적분에 의한 방법으로 변위를 구할 때 그림 6에서처럼 속도 신호의 크기가 $V_{AC}=93\text{mV}$ 일 때, 변위를 구하면 식 (13)에서

$$S_{AMP} = \int_0^{T/4} v(t) dt = \frac{\lambda V_{AC}}{2K \omega_s} = 6.244 \mu\text{m} \text{ 이고,}$$

fringe counting 방법에 의해 구하면, 그림 6의 출력이 얻어 질 때 fringe pattern 신호는 그림 7과 같이 나온다. 그림에서 bright point인 peak point의 수 N 은 42개이다.

이 때 변위를 구하면 식 (14)에서

$$S_{p-p} = N \frac{\lambda}{2} = 13.289 \mu\text{m}$$

$\therefore S_{AMP} = S_{p-p}/2 = 6.644 \mu\text{m}$ 이다.

이상에서 두 가지 방법이 근사한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 국내에서 시행되었던 LDV 연구에서는 오실로스코프로 측정 가능한 $0.25 \mu\text{m}/\text{mV}$ 약 $\lambda/10$ 정도의 분해능을 갖는데 [2], 본 연구에서는 $\lambda/10$ 보다 높은 분해능을 갖는 변위 측정용 fringe counting 방법을 사용하였다.

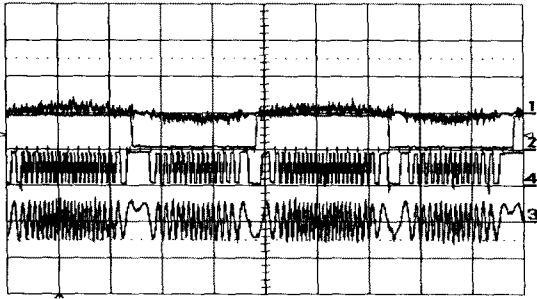


그림 8 : digital부 각 부에서의 출력신호

그림 8은 digital부에서 얻은 각 부에서의 출력신호이다.

그림 8의 ①은 PLL 출력신호로서 zero-crossing detector에서 그림 8의 ②와 같은 TTL 신호를 얻게 된다. 이 신호는 counter enable 신호로 사용되었다. 그림 8의 ③은 RF중폭부의 출력신호와 40MHz local oscillator의 신호를 mixing하여 얻은 fringe pattern 신호인데 zero-crossing을 하여 그림 8의 ④와 같은 counter 입력 TTL 신호를 얻었다. 이 신호를 counting하여 μ -processor에서 변위를 구하고 LCD로 display하였다.

그림 8의 ①과 ③번 그림을 보면 ①의 PLL 출력신호가 zero를 지나는 점, 즉 속도가 zero인 점에서 ③의 fringe pattern 신호에서 fringe의 수가 가장 적고 속도가 peak인 점에서 fringe 수가 가장 많은 점이 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 ①의 속도 신호에서 속도가 zero인 점에서 다시 제로로 되는 점 사이동안의 fringe를 counting하면 진동하는 speaker의 변위를 구할 수 있다. 즉, 그림 8의 ② TTL 신호가 high인 동안 그림 8의 ④를 counting하여 변위를 구하였다.

그림 9는 fringe counting 방법에 의해 구한 변위와 속도의 적분 방법에 의해 구한 결과를 비교한 것이다. 두 방법 간에 약간의 오차가 발생하지만 모두 PLL 출력 전압에 비례하여 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었다.

진동에 의한 주파수의 측정은 그림 6의 PLL 출력신호의 주파수를 측정하여 구할 수 있다. 즉, 그림 8의 ① PLL 출력신호를 zero-crossing한 그림 8의 ②의 TTL 신호가 high인 시간동안 μ -processor의 clock을 counting하여 구하였다. 그림 10에서처럼 1kHz까지 speaker 진동 주파수를 측정할 수 있었다.

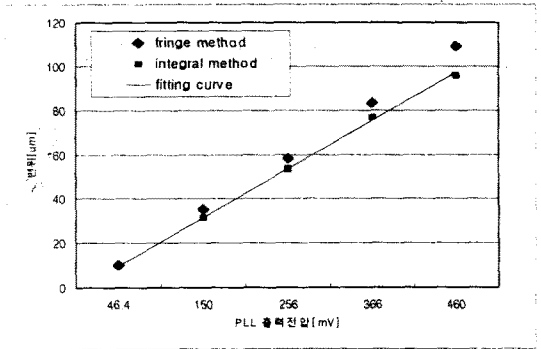


그림 9 : fringe counting 방법과 속도의 적분에 의한 방법의 비교

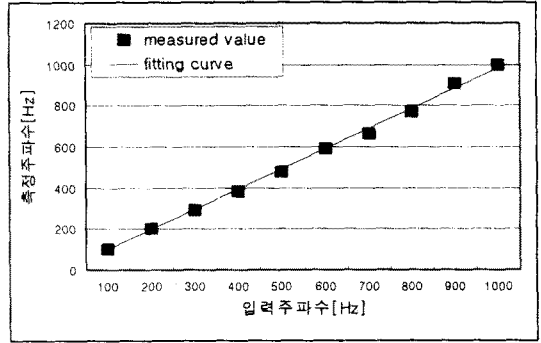


그림 10 : 주파수 측정 결과

3. 결 론

본 연구에서는 고압 기기의 공진 주파수와 진동의 변위를 측정할 수 있는 LDV의 신호처리부를 설계 및 제작하고 이를 위한 신호처리 방법을 구현하였다. 본 연구에서는 단순한 fringe counting만을 적용하여 $\lambda/2$ 의 분해능만을 얻을 수 있었지만, fringe pattern 중 counting 과정에서 잃어버리는 부분을 변위계산에 포함하면 $\lambda/50$ 이상의 분해능을 얻을 수 있고, 또 별도의 counter IC를 사용하면 counter trigger 조작에 따라 더 높은 주파수를 측정할 수 있다고 사료된다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사 전력연구원, "레이저 기술을 이용한 전력 기기의 누설전류 분석기술 연구", KRC-92A-J01, pp.126~127
- [2] 김창현, "Heterodyne Method를 이용한 레이저 도플러 진동계의 개발에 관한 연구", 전기학회 논문지, 46-7-21, 1997
- [3] R.S. Sirohi, "Optical component, system, and measurement techniques", Marcel Dekker, Inc., pp.167~170, 219~246, 363~373, 1991.
- [4] E.Wagner and K.Spencer, "Sensors (Vol. 6 Optical sensor)", pp. 318~331, pp. 557~562, 1992.
- [5] J.Wilson and J.F.B. Hawkes, "Lasers Principles and applications", Prentice-Hall, pp.145~150, 1992.