

전기기기의 진동측정을 위한 레이저 진동계의 개발

김 성 훈* . 김 호 성
중앙대학교 전기공학과

The development of Laser Vibrometer for the measurement of vibration of electric machinery

Seonghoon Kim* . Hoseong Kim
Dept. of Electrical Eng. Chung Ang University

Abstract - A Laser Doppler Vibrometer (LDV) based on the heterodyne method was developed using He-Ne laser as a light source. The heterodyne method was employed to eliminate the ambiguity in the direction of the motion. 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 combined at the fast photodetector to produce frequency modulated signal centered at 40 MHz. The signal from the detector was amplified, filtered and downconverted to intermediate frequency centered at 5 MHz. The voltage output that was proportional to the velocity of the moving surface was obtained using PLL. This LDV can be used to measure the resonant frequency of the electric equipments such as circuit breakers and bushings, of which resonant frequencies are changed when they are damaged.

1. 서 론

최근 들어 레이저도플러 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 되어가는 산업제품의 측정 및 평가에 레이저도플러 진동계는 더욱 많이 사용될 것이며 특히 최근 들어 미래기술로 주목을 받고 있는 초소형 전기기기 분야 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 분야에서는 그 수요가 급격히 증가하리라 예상된

다. 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 열화 됨에 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 측정할 수 있다.

국내에서 연구된 LDV는 IF신호의 중심주파수를 1MHz로 하여 대역폭이 20~30kHz [1]인 반면 독일의 Polytec사 제품의 경우 최대 1.5MHz의 대역폭을 갖는다. 이에 본 논문에서는 IF신호의 중심주파수를 5MHz로 하여 약 300kHz의 대역폭을 갖는 레이저 도플러 진동계의 제작 및 실험 결과에 대해 서술하고자 한다. 광원으로는 4mW 출력의 He-Ne 레이저를 사용했으며 운동방향을 구별하기 위해 object beam의 주파수를 Bragg cell을 이용하여 40 MHz 천이 시켰다. 주파수 천이된 object beam은 진동물체 표면에서 반사되고 이 반사된 빛은 기준파와 합쳐진 후 고속 광디텍터에 입사된다. 광디텍터의 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 40MHz 의 주파수 천이가 일어나게 되며 이 object beam은 beam splitter 2를 지나 focusing 렌즈에 의해 측정하려는 물체에 입

사된다. Object beam은 진동하는 물체, 본 실험에서는 audio generator 에 의해 구동되는 스피커에 의해 반사되고 다시 beam splitter 2, 3을 거쳐 reference beam과 합쳐지게 된다. 렌즈는 반사된 beam 의 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.

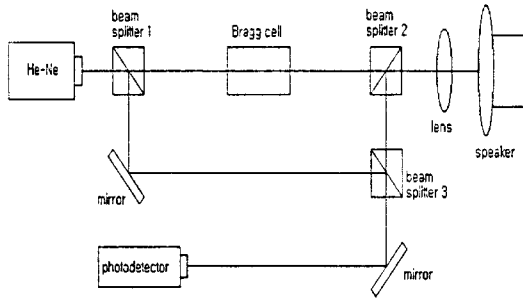


그림 1 : LDV의 개념도

Reference beam E1과 object beam E2를 다음 식과 같이 표현하고,

$$E1 = E_1 \cos \omega t \quad (1)$$

$$E2 = E_2 \cos [(\omega + \omega_B)t + \delta] \quad (2)$$

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.

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

이 경우 Photodetector의 출력전류는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I \propto |E|^2 = |E_1 + E_2|^2 \\ = |E_1 \cos \omega t + E_2 \cos [(\omega + \omega_B)t + \delta(t)]|^2$$

PIN photodetector 는 ω 의 주파수 성분은 측정할 수 없으므로 출력전류는

$$I = I_0 [1 + \cos(\omega_B t + \delta(t))] \quad (5)$$

으로 표현되며, 식 (3)과 식(4)를 식 (5)에 대입하고 직류성분을 제외한 교류성분만을 측정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

시간 t에서의 signal 주파수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega(t) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\omega_B t + \frac{4\pi A \cos \omega_S t}{\lambda} \right) \quad (7)$$

$$= \omega_B + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial S(t)}{\partial t} \\ = \omega_B + \frac{4\pi}{\lambda} v(t) \quad (8)$$

위 식에서 각속도를 주파수로 나타내면

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

와 같이되고, PLL의 출력전압은 입력 주파수에 비례하므로 비례상수 K를 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 [2][3].

식 8을 통해 $\omega(t)$ 를 tracking 함으로써 물체의 속도를 측정할 수 있고, 속도 v(t) 를 시간에 따라 적분함으로써 변위 S(t)를 구할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 heterodyne vibrometer는 2개의 다른 주파수를 갖는 wave를 사용하는 방법이며, homodyne method에 비해 다소 복잡한 구조이기는 하나 식 8에서와 같이 v(t)의 방향을 구별할 수 있다. 또한

간섭광의 크기를 측정하는 것이 아니라 주파수를 측정하므로 잡음에 강하고 높은 S/N 비를 얻을 수 있어 작은 반사광으로도 높은 측정정밀도를 얻을 수 있다.[3][4] 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 길게하면, 즉 광경로차를 가능한 한 같게 하면 측정신호를 깨끗하고 크게 할 수 있다. 구성도 에서처럼 object beam의 경로는 Bragg cell과 렌즈를 통과하고 물체에 반사되는등 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[2][3].

2.2.2 신호처리부

다음 그림 2는 광학부에서 측정된 신호의 처리단계를 나타낸 블록도이다.

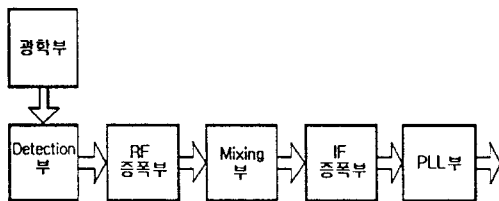


그림 2 : 신호처리부의 블록도

광학부에서 측정된 신호를 처리하는 단계는 다음과 같다.

Detection부는 광신호를 40MHz를 중심 주파수로 하고 Dop-pler천이에 의해 FM변조된 전기적 신호로 바꾸는 회로이다. 디텍터로는 Hamamatsu사의 PIN photodetector를 사용하였고, 증폭기로는 AD849를 photoconductive mode로 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 5MHz인 IF신호로 주파수를 낮추는 회로이며, 35MHz의 출력을 갖는 crystal 발진기와 AD834 곱셈기를 사용하였다. IF 증폭부에서는 Mixer의 출력을 증폭하고 고주파를 filtering하는 회로이며, 증폭기로써 AD849와 low-pass filter를 사용하였다. PLL부는 IF신호에서 속도에 비례하는 Doppler shift 주파수를 검출하는 회로이며 NE564 PLL chip을 사용하였고, 출력은 5MHz와 IF신호 주파수와의 차이에 비례하는 전압이다.

2.3 실험결과 및 분석

다음은 스피커의 입력주파수를 100Hz로 고정하여 실험한 결과이다.

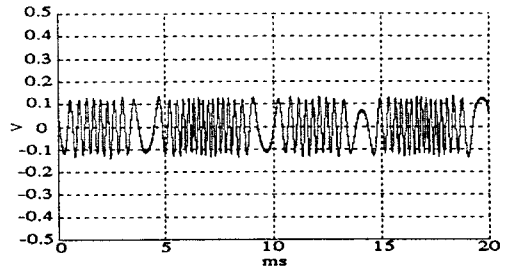


그림 3 : RF 출력 파형

그림 3은 RF증폭부의 출력을 millisec의 시간축에서 오실로스코프로 관측한 결과이다. millisec 시간축에서 측정하면 그림 3과 같이 fringe counting을 할 수 있는 전형적인 간섭패턴을 볼 수 있었다. 그러나 같은 출력을 nanosec 시간축에서 측정하면 40 MHz 정도의 주파수를 갖는 신호를 볼 수 있으며, 그 주파수는 물체의 속도에 비례하여 변함을 관측할 수 있었다. 또한 RF증폭부 출력을 주파수분석기로 측정하면 그림 4와 같이 중심주파수가 40MHz이고 변조폭이 물체의 속도에 비례하는 FM변조된 신호를 관측할 수 있었다.

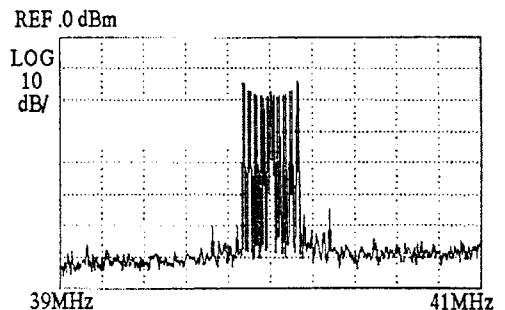


그림 4 : RF 출력신호의 스펙트럼

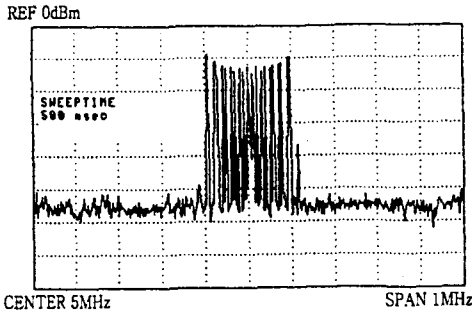


그림 5 : PLL 입력전압의 스펙트럼

그림 5는 IF중폭부의 출력을 주파수분석기로 측정 한 결과이며 중심주파수가 5MHz이고 변조폭이 200KHz인 FM신호 이고, 그 크기는 PLL의 선형출력을 얻을 수 있는 200mV이상인 것을 알 수 있다. 또한 스피커의 입력주파수를 고정하고 크기만을 증감할 경우 스피커 표면의 속도가 증감하여 변조폭이 비례적으로 증감함을 관측할 수 있었다.

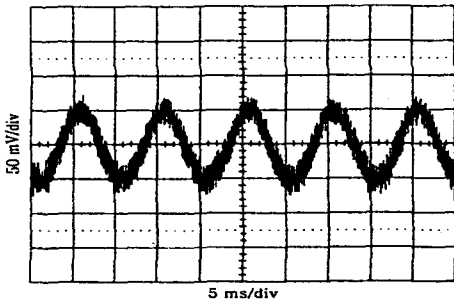


그림 6 : PLL 출력파형

그림 6은 PLL출력전압 파형이며 그 주파수는 스피커의 입력주파수와 같은 100Hz임을 알 수 있으며 스피커의 입력신호의 크기를 증감하면 출력전압의 크기도 비례하여 증감함을 확인할 수 있었다. 또한, 입력주파수를 증가시키며 측정한 결과 300kHz 정도까지 PLL의 출력전압이 입력주파수에 선형적으로 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발한 LDV의 bandwidth는 350kHz 정도이며, 이 결과는 PLL의 loop-gain control 전류를 가하지 않은 것으로 gain control 전류를 가해줄 경우 중심주파수의 20%이상, 즉 1MHz 정도의 대역폭을 가질 수 있을 것으로 사료된다.[5]

3. 결 론

본 연구에서는 고압기기의 공진주파수를 측정할 수 있으며 대물렌즈를 장착할 경우 MEMS분야에서도 사용할 수 있는 LDV의 광학부와 신호처리부를 설계하고 구현하였다. 현미경의 대물렌즈를 장착할 경우 beam의 직경이 3 μ m접속할 수 있었으며 카메라의 증렌즈를 사용할 경우 5m거리에 있는 물체의 진동을 측정할 수 있었다.

향후 연구과제로는 다음과 같은 것들이 있다.

첫째, PLL 출력 포화로 인해 대역폭에 한계가 있었으나 5MHz의 IF 중심주파수를 system의 구성에 따라 10MHz로 변환하여 측정함으로써 대역폭을 증가시킬 수 있을 것이고, 그로 인해 더 큰 속도와 변위의 분해능을 얻을 수 있게 될 것이다. 따라서, 진동하는 물체에 따라 측정 레인지를 변환할 수 있도록 system을 구성하는 일이 향후에 이어져야 할 것이다.

둘째, PLL 복조(Demodulation)방법은 높은 S/N비를 갖고, 좋은 선형성과 높은 분해능을 가지고 있으나 약간의 제한된 bandwidth를 갖는 것이 단점이다. PLL의 입력주파수와 출력전압의 관계가 선형적인 함수가 아닌 로그함수를 갖는다면 더 큰 bandwidth를 갖게 될 것이다. 이는 향후에 더 큰 속도와 변위 측정을 위해 PLL복조 방법에 있어서 개선되어야 할 부분이다.

셋째, FFT를 이용한 측정된 신호의 주파수 특성 분석 system의 구성이 있다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] 김창현, "Heterodyne Method를 이용한 레이저 도플러 진동계의 개발에 관한 연구", 전기학회 논문지, To be published
- [2] R.S. Sirohi, "Optical component, system, and measurement techniques", Marcel Dekker. Inc., pp. 219~246, 363~373, 1991.
- [3] E.Wagner and K.Spennner, "Sensors (Vol. 6 Optical sensor)", pp. 318~331, pp. 557~562, 1992.
- [4] J.Wilson and J.F.B. Hawkes, "Lasers Principles and applications", Prentice-Hall, pp.145~150, 1992.
- [5] Philips Semiconductor RF Communications Products NE564 (databook pp.389~395)