

초음파 측정용 레이저 도플러 진동계의 개발에 관한 기초연구

김명선 김호성  
 중앙대학교 전기공학과

Basic Study for the Development of Laser Doppler Vibrometer for the Detection o

Myoungsun Kim Hoseong Kim  
 Dept. of Electrical Eng. Chung Ang Univ.

**Abstract** - In order to detect the ultrasonic that is generated by the partial discharge of the heavy electric machinery, a Laser Doppler Vibrometer (LDV) was developed. A Michelson type interferometer which employed heterodyne signal process technique was built to measure the frequency and amplitude of vibration. The output signal of the fast photodetector was a 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(PZT) was obtained using PLL. The spectrum of the FM signal was analyzed and integration method was introduced to obtain amplitude information. This LDV can be used to measure the vibration of MEMS devices, automobiles, HDD and CDP.

을 해석하였으며, 진동의 크기를 구하였고, calibration에 사용하였다.

2. 본 론

2.1 초음파 측정용 LDV 이론

그림 1에서와 같이 LDV는 진동하는 PZT (Piezoelectric Transducer)에 빛이 반사되어 나올 때 주파수 천이(Shift)가 일어나는 현상 즉, 도플러효과를 이용하여 그 shift된 주파수를 통하여 진동자의 속도와 변위를 측정한다. He-Ne laser beam은 beam splitter 1에 의해 reference beam과 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 function generator에 의해 구동되는 PZT의 표면에 반사되고 다시 beam splitter 2, 3을 거쳐 reference beam과 합쳐지게 된다. 렌즈는 반사된 beam의 light scattering losses를 최소화하고, 반사된 beam의 wavefront deformation을 최소화 하기 위해 사용되었다. 이렇게 합쳐진 두 빛은 간섭을 일으키게 되고 이 빛은 응답속도가 빠른 PIN-photodetector를 통해 광 신호로부터 전기적인 신호로 바뀌어진다.

1. 서 론

경제발전에 따른 전력수요의 증가로 인하여 전력계통은 초고압, 대규모화 되어가고 첨단제품이 소형화, 경량화 되어감에 따라 넓은 측정범위를 가지고 있으며 현장에서 적용하기 쉬운 진단기술이 필요하게 되었다. 전력기기의 부분 방전을 측정하는 경우에 접촉식 측정기는 주변 자계의 영향을 많이 받게되고, 또한 원거리 측정기는 공기 중에서 초음파 신호의 감쇠가 심하기 때문에 측정에 어려움이 있었다. 그런데LDV(Laser Doppler vibrometer)는 속도에 대하여 거의 선형적인 출력을 얻을 수 있고 비접촉식이기 때문에 여러 가지 장점을 가질 수 있다. 기존의 연구는 대부분 광학부만을 구성하고 그 출력을 처리하기 위하여 Spectrum analyzer, Lockin Amplifier, Modular amplifier 등 고가의 장비를 사용하여 가능성만을 보여주는 연구였다. 그러나 현재 광계측 장비의 경향을 보면 광학부는 간단히 처리하고 신호처리부에서 다양한 기법을 채택하는 방향으로 발전하고 있다. 국내에서 시행된 LDV 연구[1]는 가청 주파수대역 이하의 주파수를 측정하는 연구이었다. 본 논문에서는 변압기와 같은 대형 전력기기의 부분 방전시 발생하는 초음파를 측정할 수 있는 레이저 도플러 진동계의 개발에 관한 연구를 서술하고자 한다. 광원으로는 1mW 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. Bessel function을 사용하여 FM spectrum

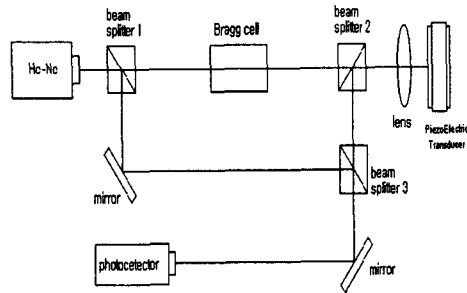


그림 1. 초음파 측정용 LDV 광학부 구성도

Reference beam E<sub>1</sub>과 object beam E<sub>2</sub>를 다음 식과 같이 표현하고,

$$E_1(t) = E_1 \exp(i\omega t) \tag{1}$$

$$E_2(t) = E_2 \exp[i(\omega + \omega_B)t + \delta(t)] \tag{2}$$

$\omega$  : laser beam frequency

$\omega_B$  : Bragg cell에 의한 frequency shift

$\delta(t)$  : 진동에 의한 위상 변화

function generator에 의해 구동되는 PZT(Piezoelectric Transducer)의 변위  $S(t)$ 를 다음과 같이 표현하면

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

A : 진폭

$\omega_s$  : function 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  $\mathbf{I} = [\mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{E}(t)^*] / 2$  에 비례하므로 출력 전류는

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

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

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 t에서 신호의 주파수는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

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

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

$$= \omega_B - \frac{4\pi}{\lambda} \omega_s A \sin \omega_s t \quad (9)$$

위 식에서 각속도를 주파수로 나타내면

$$f = f_B - \frac{2}{\lambda} A \omega_s \sin \omega_s t \quad (10)$$

가 되고 최대 주파수 편이는 다음과 같다.

$$\Delta f_D = \frac{2A}{\lambda} \omega_s \quad (11)$$

이상으로부터 photodetector의 출력신호는 중심주파수  $f_B$ 가 40MHz인 주파수 변조된 신호임을 알 수 있다. spectrum analyzer로 측정한 FM 신호의 형태는 그림 2, 그림 3에 도시하였다. 그림 2는 PZT를 100Hz로 구동시켰을 때 spectrum이며 이 경우에는 주파수가 매우 낮으므로 spectrum analyzer에서 FFT를 적용할 때 적분시간이 신호의 주기에 비해 짧으므로 화면에 표시되는 주파수 특성은 엄밀한 의미에서 spectrum이 아니며 단순히 각 시간에서의 주파수와 그 크기를 의미하는 것이다. 그러므로 최대 주파수 편이는 spectrum상에서 최대주파수와 중심주파수의 차이이다. 그런데 높은 modulation frequency로 PZT를 구동하였을 때의 신호의 주파수 특성은 그림 3과 같고 그 수식은 다음과 같다.

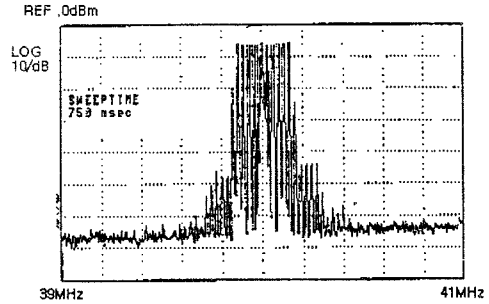


그림 2. 100 Hz로 P.Z.T를 구동 시 RF 출력신호

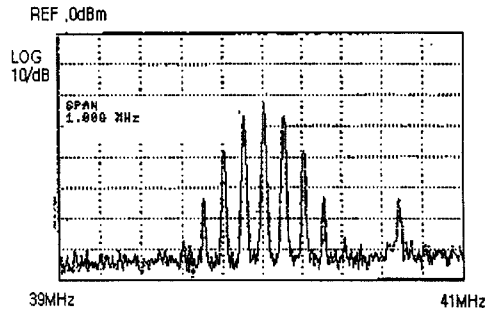


그림 3. 50 kHz로 P.Z.T를 구동 시 RF 출력신호

$$\begin{aligned} f(t) &= J_0(m_f) \cos \omega_B t - J_1(m_f) [\cos(\omega_B - \omega_s)t \\ &\quad - \cos(\omega_B + \omega_s)t] + J_2(m_f) [\cos(\omega_B - 2\omega_s)t + \\ &\quad \cos(\omega_B + 2\omega_s)t] - J_3(m_f) [\cos(\omega_B - 3\omega_s)t] + \dots \quad (12) \end{aligned}$$

$$m_f = \text{FM modulation index} = \frac{\Delta f_D}{f_m} \quad (13)$$

$\Delta f_D$  = 최대 주파수 편이

그림 3에서 나타내는 중심주파수의 크기에 대한 side-frequency component 크기의 비를 식(12)와 비교하여  $m_f$ 를 구할 수 있고  $\Delta f_D$ (최대 주파수 편이) =  $m_f \times f_m$  인 관계를 이용하여  $\Delta f_D$ 를 구할 수 있다. [2]

최대 주파수 편이로부터 최대 변위를 구하면, 식(11)로부터

$$A = \frac{\Delta f_D}{2\omega_s} \lambda \quad (14)$$

이다. 이상은 spectrum analyzer의 출력으로부터 구하는 방법이며 본 논문에서는 spectrum analyzer를 사용하지 않고 PLL을 사용하여 크기를 구하고자 한다. PLL의 출력전압은 입력 주파수에 비례하므로 PLL 시스템 비례상수 K를 사용해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(t) = K \left( f_B - \frac{2}{\lambda} A \omega_s \sin \omega_s t \right)$$

$$= K \left( f_B + \frac{2}{\lambda} v(t) \right) \quad (15)$$

이때 교류성분만을 취하면 다음과 같고

$$V_{AC} = K \frac{2}{\lambda} v(t) \quad (16)$$

위 식에서 PZT의 속도는

$$v(t) = \frac{\lambda}{2K} V_{AC}(t) \quad (17)$$

과 같이되고, 이를 적분하면 변위는 다음과 같이된다.

$$A = \int_0^{T/4} \frac{\lambda}{2K} V_{AC}(t) dt \quad (18)$$

위 식에서 A 는 PZT 진동의 변위, T 는 PZT 진동의 주기이다.

### 2.2 광학부와 신호처리부의 구성

본 연구에서 개발한 초음파 측정용 LDV의 광학부 구성도를 그림 1에 보였다. 그림 1의 구성도에서 처럼 object beam의 경로는 Bragg cell과 렌즈를 통과하고 PZT 반사되는 등 복잡한 경로를 갖게 되어 경로조정이 용이하지 않으나, reference beam은 왼쪽의 mirror단을 조정함으로써 detector에 입사하는 beam을 조절할 수 있기 때문에 그림 1과 같이 광학장치를 구성하는 것이 두 beam의 간섭경로가 일치하도록 쉽게 조절할 수 있다. 먼저 조정이 어려운 object beam을 물체에 반사시킨 후에 reference beam을 조정하여 경로를 일치하게 하였다[3].

신호처리부의 구성은 그림 4에 나타내었다. 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, Philips사의 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, gain이 1 일 때 6MHz의 -3dB Bandwidth를 갖는 instrumentation amplifier와 증폭기로서 LM6365와 lowpass filter를 사용하였다. 이는 PLL의 Capture range를 넓게 하기 위하여 VCO free running frequency를 5MHz로 하였을 때를 위함이다. PLL부는 IF신호에서 속도에 비례하는 Doppler shift 주파수를 검출하는 회로이며 NE564 PLL chip을 사용하였고, 출력은 VCO free running 주파수 1MHz와 IF신호 주파수와의 차이에 비례하는 전압이다.



그림 4. 신호처리부 블록도

### 2.3 실험결과 및 분석

그림 5에 RF Signal Generator를 사용하여 최대 주파수 편이를 고정시키고 modulation Frequency를 변화시키면서 측정된 신호처리부의 PLL 출력 전압의 최대값을 나타내었다.

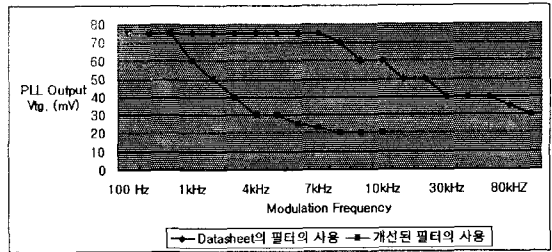


그림 5. Modulation Frequency에 따른 PLL 출력전압의 최대값

이론적으로는 PLL 출력전압은 최대 주파수 편이에 비례하고 변조 주파수와 관계없이 일정해야 하지만 본 연구에서 제작한 PLL의 출력전압은 그림 5와 같이 높은 주파수에서 그 크기가 작아졌다. 본 연구에서 사용한 PLL Chip의 capture range가 30%이므로 300 kHz까지의 초음파를 측정할 수 있으리라 판단하여 PLL의 free running frequency를 1 MHz로 하고, Datasheet의 post detection filter를 사용하여 실험한 결과 위의 그림에서 볼 수 있듯이( ) 500Hz 이상에서는 그 크기가 급격하게 줄어드는 것을 발견하였다. 초음파영역에서도 작동할 수 있도록 개선된 필터를 설계하여 사용한 경우( )에는 20 kHz이상의 초음파 영역에서도 PLL 출력이 40 mV 이상으로 개선된 값보다 크게 향상되었음을 알 수 있다. 300kHz까지의 초음파를 측정하기 위해서는 PLL 출력 전압이 300kHz까지 일정해야 하므로 PLL의 free running frequency를 5MHz로 올린 PLL 회로를 제작하여 실험하였다. 그림 6에 변조 주파수가 50kHz이고 최대 주파수 편이가 40kHz일 때의 PLL 출력 파형을 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 출력전압의 크기가 매우 작고 노이즈가 심하여 이를 개선하기 위해 연구를 진행 중이다.

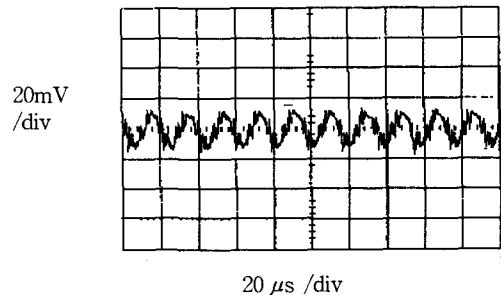


그림 6. 50kHz 변조 주파수 입력시 PLL 출력

### 3. 결 론

본 연구에서는 PLL 중심주파수를 1MHz로 하고 실험하였을 때 약 80 kHz의 modulation frequency까지는 40mV 정도의 출력을 확인 할 수 있었다. 80 kHz 이상의 modulation frequency 를 갖는 초음파 신호를 측정하기 위하여 5 MHz로 중심 주파수를 옮겼

을 때 20mV 정도의 낮은 출력전압을 나타내었다. 따라서 wideband amplifier와 노이즈를 줄일 수 있는 고특성의 active filter의 설계가 필요하다. 또는 Digital IC를 사용하여 Digital delay를 이용한 DPLL[4] 이 용한다면 더 넓은 주파수 범위의 측정이 가능하다고 본다. 이러한 LDV가 개발된다면 부분방진 뿐만 아니라 MEMS, 자동차, HDD, CDP등의 진동측정에 유용하게 이용할 수 있다고 사료된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 김성훈, "레이저 도플러 진동계를 이용한 진동변위와 주파수 측정방법 연구", 전기학회 논문지, E.p1824~1827, 1998
- [2] Gary M. Miller, "Modern Electronic Communication", Frequency Modulation, chap 5, p177~221, 1996
- [3] R.S. Sirohi, "Optical component, system, and measurement techniques", Marcel Dekker. Inc., pp.167~170, 219~246, 363~373, 1991.
- [4] Roland E. Best, "The Classical Digital PLL", Phase Locked Loops, p.91~126, 1997