

초음파 측정용 레이저 도플러 진동계의 제작에 관한 연구

김승종 김명선 김호성  
 중앙대학교 전자전기공학부

Basic Study for the fabrication of Laser Doppler Vibrometer for the Detection of Ultrasonic

Myoungsun Kim Seungjong Kim Hoseong Kim  
 Dept. of Electrical & Electronics 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) is developed. A Michelson type interferometer which employed heterodyne signal process technique is built to measure the frequency and amplitude of vibration. The output signal of the fast photodetector is a frequency modulated signal centered at 40 MHz. The signal from the detector is amplified and converted to intermediate frequency centered at 1 Mhz after mixing process. The voltage output that is proportional to the velocity of the moving surface(PZT) is obtained using PLL. The spectrum of the FM signal is 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.

여 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 최소화하기 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 물리/화학적 영향을 심하게 받고, 또한 원거리 측정기는 공기 중에서 초음파 신호의 감쇠가 심하기 때문에 측정에 어려움이 있었다. 그런데 LDV(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 신호처리 부에서 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. 본 연구에서는 300 kHz에서 최소 1 nm까지의 진동 변위를 측정할 수 있는 LDV를 개발, 제작 하였다.

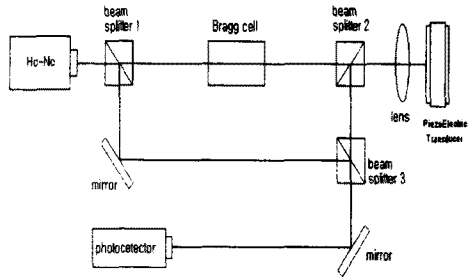


그림 1. 초음파 측정용 LDV 광학부 구성도

Reference beam  $E_1$ 과 object beam  $E_2$ 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 PZT의 변위  $S(t)$ 를 다음과 같이 표현하면

$$S(t) = A \cos \omega_S t \tag{3}$$

A : 진폭

$\omega_S$  : function generator frequency

이때의 진동에 의한 위상변화는 다음과 같다.

2. 본 론

2.1 초음파 측정용 LDV 이론

그림 1.에서와 같이 LDV는 진동하는 PZT (Piezoelectric Transducer)에 빛이 반사되어 나올 때 주파수 천이가 일어나는 현상 즉, 도플러효과를 이용하여 그 shift된 주파수를 통하

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

Photodetector에 입사되는 빛은  $E(t)=E_1(t)+E_2(t)$  이고, 이 경우 Photodetector의 출력전류  $I(t)$ 는 입사되는 빛의 intensity  $I=[E(t) \cdot E(t)^*]/2$  에 비례하므로 출력 전류는

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

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

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

식(3)을 식(6)에 대입하고 위상을 시간으로 미분하여 신호의 주파수로 나타내면

$$f = f_B - \frac{2}{\lambda} A \omega_S \sin \omega_S t \quad (7)$$

가 되고 최대 주파수 편이는 다음과 같다.

$$\Delta f_D = \frac{2A}{\lambda} \omega_S \quad (8)$$

이상으로부터 photodetector의 출력신호는 중심주파수가  $f_B(40\text{MHz})$ 인 주파수 변조된 신호임을 알 수 있다. 최대 주파수 편이는 최대주파수와 중심주파수의 차이이고, 주파수 변조 지수  $m_f$ 는  $\Delta f_D / f_m$  로 정의되어진다.

중심주파수의 크기에 대한 side-frequency component 크기의 비와 베셀함수를 이용하여  $m_f$ 를 구할 수 있고  $\Delta f_D(\text{최대 주파수 편이}) = m_f \times f_m$  인 관계를 이용하여  $\Delta f_D$ 를 구할 수 있다. [2]

최대 주파수 편이로부터 최대 변위를 식(7)로부터 구하면 다음과 같다.

$$A = \frac{\Delta f_D}{2\omega_S} \lambda \quad (9)$$

이상은 주파수 분석기의 출력으로부터 구하는 방법이며 본 논문에서는 주파수 분석기를 사용하지 않고 DPLL을 사용하여 크기를 구하고자 한다. DPLL의 출력전압은 입력 주파수에 비례하므로 DPLL 시스템 비례상수 K를 사용해 다음과 같이 표현된다.

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

이때 교류성분만을 취하면 다음과 같고

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

이신호의 최대값  $V_{\max}$ 를 DPLL의 출력으로부터 측정하여 구하면 진동의 최대 변이와 최대 주파수편이를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A = \frac{\lambda}{2\omega_S K} V_{\max} \quad (12)$$

$$\Delta f_D = \frac{1}{K} V_{\max} \quad (13)$$

## 2.2 신호처리부의 구성

신호처리부의 구성을 그림 2에 나타내었다. 광학부에서 측정된 신호를 처리하는 단계는 다음과 같다. Detection부는 광 신호를 40MHz를 중심 주파수로 하고 Doppler편이에 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 전기신호를 중심주파수가 2.5MHz(DPLL 중심주파수)인 IF신호로 주파수를 낮추는 회로이다. IF증폭부에서는 주파수 변환부의 출력을 증폭하고 고주파를 제거하는 필터회로 구성되며, AMP03 계측 증폭기와 광대역 증폭기로서 LM6365와 저주파 통과 필터를 사용하였다.

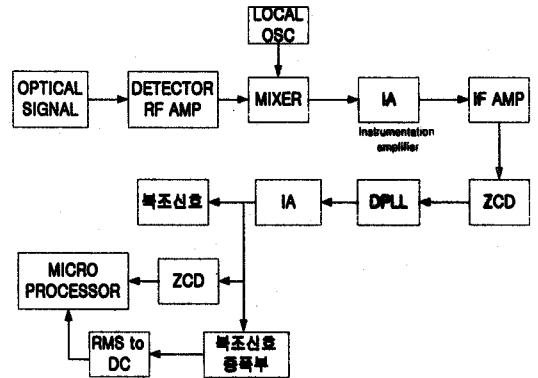


그림 2. 신호처리부 블록도

DPLL에 입력되는 신호는 디지털 신호로 변환되어야 한다. 디지털 신호처리부의 입력으로써 ZCD를 사용하여 DPLL에 입력하였다. 본 연구에서 사용한 DPLL 디바이스는 FairChild사의 74VHC4046이며, 최대 동작 주파수가 12MHz 이고 디텍터의 반응시간이 25ns이다. 또한 주파수의 선형성과 온도 특성이 우수한 디바이스이다.

DPLL의 출력 즉, FM 복조신호는 AD620(계측 증폭기)를 통과하여 노이즈가 제거되고 증폭된다. 증폭된 신호는 두 갈래로 나뉘어진다. 첫 번째로 ZCD를 통하여 디지털 신호로 변환되어 주파수를 계산하기 위하여 마이크로 프로세서에 입력된다. 두 번째로 OP-37 3개로 조합하여 구성된 계측 증폭기 형태의 복조신호 증폭부로 입력된다. 증폭된 신호는 실효치-직류치 컨버터를 통하여 직류 값으로 출력된다. 이 직류 출력전압은 변위를 계산하기 위하여 마이크로 프로세서로 입력된다.

## 2.3 실험결과 및 분석

식(13)을 보면, DPLL 출력 전압은 변조 주파수와는 관계없이 일정한 비례관계가 있음을 알 수 있었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 최대 주파수 편이가 80kHz 일 때의 출력 전압은 전체 변조 주파수 변화에 걸쳐서 일정하게 40kHz 일 때의 출력전압의 2배임을 알 수 있었다. 그러나 실제 실험 결과 그림 3에서 알 수 있듯이 변조 주파수가 증가함에 따라서 조금씩 감소함을 알 수 있다. 이는 신호처리부 회로에 사용된 각종 필터와 증폭기들의 주파수 특성 때문이다.

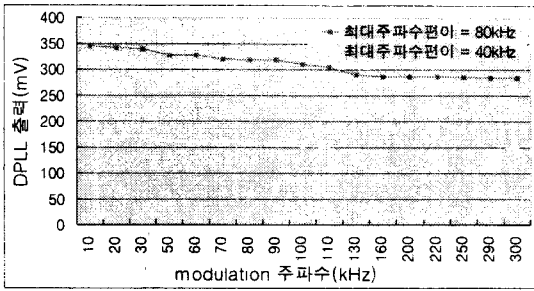


그림 3. 최대 주파수 편이를 고정시키고 변조 주파수를 변화시켰을 때 DPLL 출력전압의 실효값

그림 3.을 보면 변조주파수에 따라 출력이 조금씩 감소하므로  $K$ 는 변조 주파수에 대해 감소함수이고  $V_{rms} = K(f) \Delta f_D$ 에서 시스템 비례상수를 나타낸다. 그러므로 임의의 변조 주파수  $f$ 에서 측정된  $V_{rms}$ 로부터 최대 주파수 편이  $\Delta f_D$ 를 구하기 위해서는  $K$ 를 주파수  $f$ 의 함수로 나타내야 한다.

시스템 비례상수  $K(f)$ 를 각 변조 주파수에 따른 기용기의 함수로 나타낸 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$K(f) = -8 \times 10^{-2} \times f + 0.0526 \text{ (V/Hz)}$$

이때 최대 주파수 편이는 다음과 같고

$$\Delta f_D = \frac{1}{K(f)} V_{rms} = \frac{V_{rms}}{-8 \times 10^{-5} \times f + 0.0526} \quad (14)$$

진동변위는 식 10에 의해

$$A = \frac{\lambda}{2 \times 2\pi \times f} \times \frac{V_{rms}}{-8 \times 10^{-5} \times f + 0.0526} \quad (15)$$

이다.

$$K(f) = -8 \times 10^{-2} \times 100 + 0.0526 = 44.6 \text{ (V/Hz)}$$

$$V_{rms} = 3.6 \text{ (V)}$$

식 (14)에 위값을 대입 최대주파수편이를 구하면

$$\Delta f_D = 80.717 \text{ (kHz)}$$

이다.

이때의 오차를 계산하면

$$\frac{80.717 - 80}{80} \times 100 = 0.89\% \text{ 이다.}$$

식 (15)에 의하여 구해진 최대 주파수 편이로부터 진동변위를 구하면 다음과 같다.

$$\text{진동변위 (A)} = 40.6463 \text{ nm}$$

따라서 PZT가 최대 주파수 편이가 80kHz일 때 100kHz의 변조 주파수로 진동할 경우 진동변위는 약 40nm임을 알 수 있었다.

그림 4.는 본 논문의 내용에 의해 개발된 LDV의 측정범위를 나타낸 것이다. 그림에서 실선을 보면, 1Hz에서 약 1000nm의 진동변위 측정이 가능하고 주파수가 높아짐에 따라 측정 가능한 진동변위는 감소하여 최대 300kHz의 modulation 주파수 범위에서 1nm의 진동변위의 측정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 이 진동변위의 값은 최소값이며 각 주파수에 해당하는 진동변위의 최대값은 실험에 사용한 진동자의 최대변위가 제한되어 측정할 수가 없었다. 점선은 실험에 사용한 진동자의 최대 진동범위를 나타낸 것이다.[4]

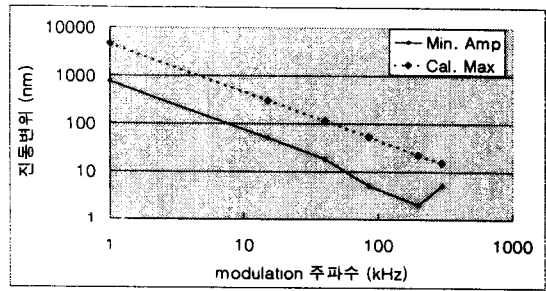


그림 4. 측정범위

### 3. 결 론

본 연구에서는 변압기와 같은 대형 전력 기기의 부분 방전시 발생하는 초음파 신호를 측정할 수 있는 LDV를 DPLL 방식을 사용하여 설계, 제작하였다. 최대 주파수 편이를 일정하게 하였을 때 20kHz부터 300kHz 까지 거의 일정한 크기의 DPLL 출력전압을 얻을 수 있었다. 진동의 크기가 8nm 이상일 때 20kHz에서 300kHz 사이의 초음파 주파수 영역에서 10% 이내의 오차를 나타내었다. 마이크로 프로세서를 이용하여 주파수와 진동변위를 계산한 결과 300 kHz에서 최소 1 nm까지의 진동변위를 감지할 수 있었다.

본 논문은 한국과학재단 특정기초연구 사업의 지원에 의한 내용임(과제번호:1999-2-302-015-3)

### [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 Communic Frequency Modulation, chap 5, p177~221, 1996
- [3] R.S. Sirohi, "Optical component, system, and measurement techniques", Marcel Dekker, Inc., pp.1 219~246, 363~373, 1991.
- [4] 김명선 "DPLL을 이용한 초음파 측정용 레이저 도플러 진동계의 개발에 관한 연구", 학위논문, 1999