

## Digital PLL을 이용한 초음파진동 측정용 레이저 도플러 진동계의 개발

김명선·김승중·김호성<sup>1</sup>

중앙대학교 전자전기공학부

(156-756) 서울시 동작구 흑석동 221번지

(2000년 1월 18일 받음, 2000년 9월 5일 수정본 받음)

본 논문에서는 초음파영역에서 진동하는 물체의 진동주파수와 크기를 측정할 수 있는 레이저 도플러 진동계(Laser Doppler Vibrometer, 이하 LDV)를 설계, 제작하였다. LDV의 광원으로는 파장이 632.8 nm인 He-Ne 레이저를 사용하였으며 Bragg셀에 의해 주파수가 천이되도록 한 마이켈슨형 간섭계(Michelson interferometer)로 구성하였다. PIN다이오드의 출력은 중심주파수가 40 MHz인 주파수 변조된 신호이며, 이 신호를 증폭하고 주파수를 2.5 MHz로 낮춘 후 디지털로 변환하였다. Digital Phase Locked Loop(이하 DPLL)를 사용하여 진동하는 표면의 속도에 비례하는 전압출력을 얻었으며, 이 신호로부터 진동주파수와 크기를 추출하고 주파수특성을 보상하기 위하여 마이크로프로세서를 사용하였다. 그 결과 300 kHz까지의 진동을 측정할 수 있었으며 300 kHz로 진동하는 경우 측정 가능한 최소진폭은 1 nm이었다. 본 연구에서 개발된 LDV는 대용량 전기기기의 부분방전에 의해 발생하는 초음파진동으로부터 초소형 전기기기의 미세진동까지 측정하는 비접촉식 진동 측정에 사용할 수 있다고 사료된다.

OCIS code : 120.7280.

### I. 서 론

현대사회에서 보다 안락하고 쾌적한 생활환경을 만들기 위해 생활공간의 공기, 물, 온도와 습도, 밝기 등을 조절하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 고도의 기술사회가 되어 감에 따라 전력의 수요는 급격히 팽창하고 있어 발전소 및 변전소내의 각종 설비가 초고압, 대용량화되고 있다. 이에 따라 사고발생에 의한 피해는 복구가 불가능할 정도로 치명적일 수가 있으므로 전력 기기의 갑작스러운 고장에 대한 정전사고 방지 대책, 최적의 보수계획 수립, 전력 기기의 잔여수명 예측 등과 같은 기술적인 문제가 대두되었다. 이러한 기술적인 문제를 해결하기 위해서는 전력 기기의 운전상태를 상시 감시하고 신속하게 파악할 수 있는 측정기기 및 시스템이 절실히 필요하다.

그런데 부분방전 발생시 초음파 신호측정에 관한 연구결과에 의하면 일반적으로는 75 kHz대의 초음파가 많이 사용되나 변압기의 경우 철심의 자계로 인한 잡음 때문에 100~300 kHz 부근의 고주파 영역에서 초음파를 측정하는 것이 좋은 것으로 알려져 있다. 이러한 필요에 의해 대전력용 변압기, 차단기, 애자 등이 열화 될 때 발생하는 초음파를 측정하는 방법이 많이 연구되고 있는데 일반적으로 Rogowski 코일이나 초음파센서를 이용하여 초음파를 측정한다. 그러나 이때 발생하는 신호의 크기가 수십 마이크로 볼트정도로 작고 공기 중에서 초음파의 감쇠가 매우 크므로 현장적용을 위한 실용화가 매우 어려웠다.

국내·외 수요 연구 현황을 살펴보면 대용량의 전기 기기 특히 전력변압기나 애자의 열화진단을 위해 많은 연구소 및 대학이 연구를 수행하여 왔으며, 기기에서 발생하는 초음파를 측정하여 부분방전의 유무와 수명을 예측하는 분야에 대해서도 많은 연구가 진행되어 왔다. 그런데 대부분의 초음파 측정 방법들은 초음파 센서를 기기에 부착하거나 기기로부터 0.2~1 m 떨어진 곳에 설치하여 초음파를 측정하기 때문에 전기적 절연이 어렵거나 측정 민감도가 떨어져 실용성에 문제가 있어 왔다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 미국, 일본, 독일에서 LDV<sup>1)~3)</sup>를 사용하여 전기 기기의 초음파진동을 측정하고 그 결과로부터 열화나 수명을 예측하는 연구가 계속되어 왔다. 특히 애자의 경우 지상으로부터 높은 곳에 위치하여 20 m 이상의 거리에서도 측정이 가능한 대구경 고출력 레이저를 사용한 LDV에 관한 연구가 진행되고 있다. 그러나 국내에서 사용되는 모든 LDV는 외국에서 수입한 것이므로 가격이 비싸고 고장 시 수리에 많은 시간이 걸렸다. 그럼에도 불구하고 국내에서 LDV를 연구 개발하는 대학이나 연구소가 거의 없어 그 개발이 시급하다 하겠다.

기 수행된 연구<sup>4)~5)</sup>에서는 측정 진동주파수 범위가 수 kHz에 머물렀지만 본 연구에서는 마이켈슨 간섭계의 원리를 이용한 광학부와 주파수 변환부, DPLL, 마이크로프로세서 등으로 이루어진 신호처리부로 구성되는 LDV를 개발함으로써 최대 주파수 측정범위를 300 kHz까지 넓혔다. 비접촉식 레이저 도플러 진동계는 대형 전력 기기뿐만 아니라 MEMS(Micro-Electro-Mechanical-System)장치, HDD(Hard Disk Driver), CDP(Compact Disk Player)와 같은 소형기기의 진동과 자동차 혹은 항공기 등의 엔진 또는, 동체의 진동을 측정할 수 있

<sup>1</sup>E-mail: hkim@cau.ac.kr

다. 2장에서는 LDV 이론과 LDV의 구성, 3장에서는 신호처리부의 구성, 4장에서는 실험 결과 및 분석을 서술하였다.

## II. LDV 이론과 LDV의 구성

그림 1에서의 같이 LDV는 진동하는 물체의 표면에서 빛이 반사되어 나올 때 주파수 천이가 일어나는 현상 즉, 도플러효과를 이용하여 그 변환된 주파수를 통하여 진동자의 속도와 크기를 측정한다.<sup>[6]</sup> He-Ne 레이저빔은 광분할기 1에 의해 기준광과 측정광으로 각기 나뉘어진다. Bragg셀을 통과한 측정광은 40 MHz의 주파수 천이가 일어나게 되며 이 측정광은 광분할기 2를 지나 초점 렌즈에 의해 측정하려는 물체에 입사된다. 측정광은 함수 발생기에 의해 구동되는 PZT의 표면에 반사되고 다시 광분할기 2, 3을 거쳐 기준광과 합쳐지게 된다. 렌즈는 반사된 광의 산란손실을 최소화하고, 반사된 광의 파면 왜곡(wavefront deformation)을 최소화하기 위해 사용되었다. 이렇게 합쳐진 두 빛은 간섭을 일으키게 되고 이 빛은 응답속도가 빠른 PIN 광검출기를 통해 광신호로부터 전기신호로 바뀌어진다. 이러한 헤테로다인 진동계(heterodyne vibrometer)는 2개의 다른 주파수를 갖는 파를 사용하는 방법이며, 간섭광의 크기를 측정하는 것이 아니라 FM(Frequency Modulation)변조된 신호의 주파수를 측정하므로 잡음에 강하고 높은 신호 대 잡음비를 얻을 수 있어 작은 반사광으로도 높은 측정정밀도를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 다중 주파수 레이저를 사용하는 대신에 단일 주파수 레이저를 사용하였고, Bragg셀을 이용하여 측정광을 40 MHz 주파수 천이하어 실험을 하였다.

그림 1에 나타난 기준광 E1과 측정광 E2는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

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

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

여기서  $\omega$ 는 레이저의 주파수,  $\omega_B$ 는 Bragg셀에 의해 천이되는 주파수,  $\delta(t)$ 는 진동에 의해 발생하는 위상변화이다. 함수 발생기에 의해 구동되는 PZT의 변위  $S(t)$ 와 그 진동에 의한 위상변화  $\delta(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

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

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

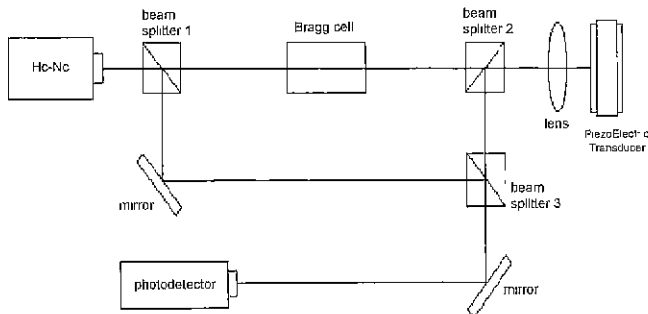


그림 1 초음파진동 측정용 LDV의 광학부 구성도.

여기서  $A$ 는 진폭,  $\lambda$ 는 빛의 파장, 그리고  $\omega_s$ 는 진동의 주파수이다. 광검출기에 입사되는 빛은  $E(t) = E_1(t) + E_2(t)$ 이고 검출기의 출력전류  $I(t)$ 는 입사되는 빛의 강도  $[E(t) \cdot E(t)^*]/2$ 에 비례하므로 출력전류는 다음 식과 같이 표현된다.<sup>[5]</sup>

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

식 (4)를 식 (5)에 대입하고 직류성분을 제거하면 출력의 교류 성분은 다음과 같이 표현된다.<sup>[2]</sup>

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

식 (3)을 식 (6)에 대입하고 위상을 시간으로 미분하여 신호의 주파수를 구하면

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

로 되고 최대 주파수 편이는 다음과 같이 표현된다.

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

이상으로부터 광검출기의 출력신호는 중심주파수가  $f_B$ (40 MHz)인 주파수 변조된 신호임을 알 수 있다. 주파수 분석기로 측정된 FM 신호의 형태를 그림 2, 그림 3에 도시하였다. 그림 2는 PZT를 100 Hz로 구동시켰을 때 스펙트럼이며 이 경우에는 주파수가 매우 낮으므로 스펙트럼 분석기에서 FFT를 적용할 때 적분시간이 신호의 주기에 비해 짧게 되어 화면에 표시되는 주파수 특성은 엄밀한 의미에서 스펙트럼이 아니며 단순히 각 시간에서의 주파수와 그 크기를 의미하는 것이다. 그러므로 최대 주파수 편이는 스펙트럼 상에서 최대주파수와 중심주파수의 차이이다. 그런데 높은 변조 주파수로 PZT를 구동하였을 때의 신호의 주파수 특성은 그림 3과 같고 그 수식은 다음과 같다.<sup>[7,8]</sup>

$$f(t) = J_0(m_f) \cos \omega_B t - J_1(m_f) [\cos(\omega_B - \omega_s)t - \cos(\omega_B + \omega_s)t] + J_2(m_f) [\cos(\omega_B - 2\omega_s)t + \cos(\omega_B + 2\omega_s)t] - J_3(m_f) [\cos(\omega_B - 3\omega_s)t] + \dots \quad (9)$$

$$m_f \text{ (FM 변조 지수)} = \frac{\Delta f_D}{f_m} \quad (10)$$

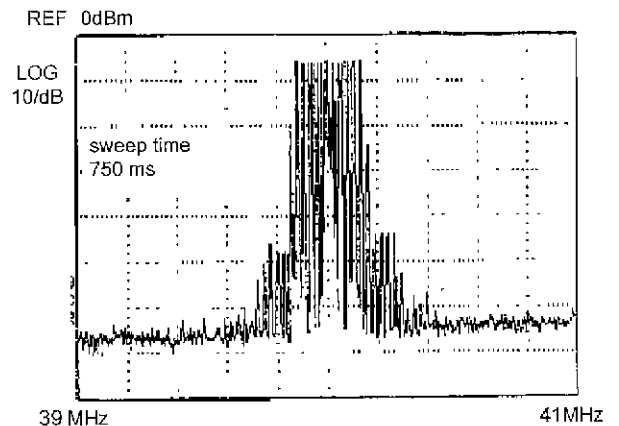


그림 2. 100 Hz로 PZT를 구동했을 때의 스펙트럼.

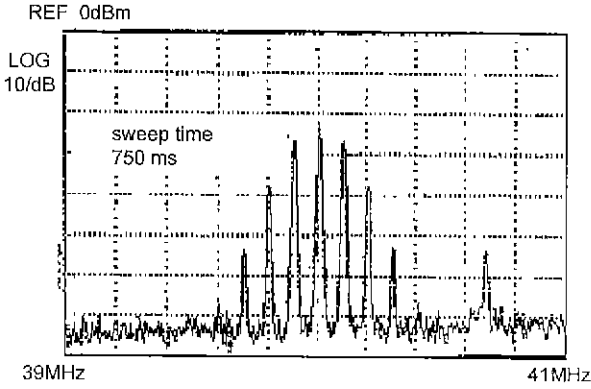


그림 3. 100 kHz로 PZT를 구동했을 때의 스펙트럼.

여기서  $\Delta f_D$ 는 최대 주파수편이며  $f_m$ 은 변조주파수이고 LDV에서는 진동주파수  $f_i$ 와 같다. 그림 3에서 나타나는 중심 주파수의 크기에 대한 측파성분(side-frequency component) 크기의 비율 식 (9)와 비교하여  $m_f$ 를 구할 수 있고 식 (10)을 이용하여  $\Delta f_D$ 를 구할 수 있다.<sup>[5]</sup> 최대 주파수편으로부터 식 (8)을 이용하여 최대 변위 즉 진폭을 구하면 다음과 같다.

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

이상은 스펙트럼 분석기의 출력으로부터 구하는 방법이며 본 연구에서는 스펙트럼 분석기를 이용하지 않고 DPLL을 사용하여 크기를 구하고자 하였다. DPLL의 출력전압은 입력 주파수에 비례하므로 DPLL 시스템 비례상수 C를 사용해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V(t) = C \left( f_B - \frac{2}{\lambda} A \omega_s \sin \omega_s t \right) = C \left( f_B + \frac{2}{\lambda} v(t) \right) \quad (12)$$

위 식에서 교류성분만을 취하면 다음과 같고

$$V_{AC}(t) = C \frac{2}{\lambda} v(t) = C \frac{2A}{\lambda} \omega_s \sin \omega_s t \quad (13)$$

이 신호의 실효치  $V_{rms}$ 를 DPLL 출력으로부터 측정하여 구하고 실험으로 구한(4장 참조) 시스템 비례상수 K를 이용하면 최대주파수 편이와 진폭을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta f_D = \frac{1}{K} V_{rms} \quad (14)$$

$$A = \frac{\lambda}{2\omega_s K} V_{rms} \quad (15)$$

### III. 신호처리부의 구성

본 연구에서 개발한 초음파진동 측정용 LDV의 광학부 구성 도를 그림 1에 보였다. 그림 1의 구성도에서처럼 측정광의 경로는 Bragg셀과 렌즈를 통과하고 PZT에서 반사되는 등 복잡한 경로를 갖게 되어 경로조정이 용이하지 않으나, 기준광은 왼쪽의 거울만을 조정함으로써 검출기에 입사하는 광을 조절

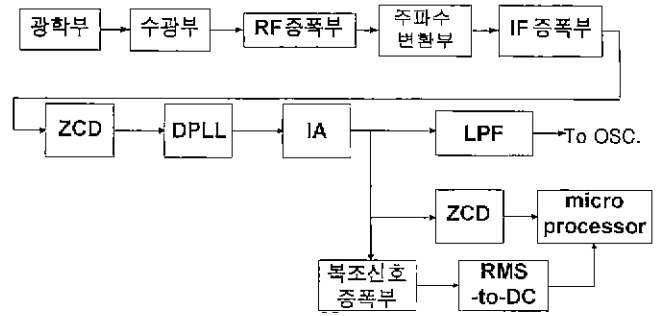


그림 4. 신호처리부 구성도.

할 수 있기 때문에 그림 1과 같이 광학장치를 구성하는 것이 두 광의 간섭경로가 일치하도록 쉽게 조정할 수 있다. 먼저 조정이 어려운 측정광을 물체에 반사시킨 후에 기준광을 조정하여 경로를 일치하게 하였다. 신호처리부의 구성을 그림 4에 나타내었다.

광학부에서 측정된 신호를 처리하는 단계는 다음과 같다. 수광부는 광신호를 전기신호로 바꾸고 증폭하는 회로이며 그 출력은 중심 주파수가 40 MHz이며 도플러천이만큼 주파수 변조된 FM신호이다. 검출기로는 Hamamatsu사의 PIN 광검출기를 사용하였고, 증폭기로는 AD849를 사용하였으며 40 MHz에서 30 dB의 증폭율을 가진다. RF증폭부는 수광부의 출력을 40 dB 정도 증폭하는 회로이며, Philips 사의 NE5204A 증폭기를 사용한 2단 증폭회로이다.

주파수 변환부는 중심주파수가 40 MHz인 전기적 신호를 중심주파수가 2.5 MHz인 IF신호로 주파수를 낮추는 회로이며, 37.5 MHz의 출력을 갖는 수정 발진기와 AD834 곱셈기를 사용하였다. 이는 다음 디지털 신호처리부인 DPLL의 중심 주파수가 2.5 MHz이기 때문이다. IF증폭부는 주파수변환부의 출력을 증폭하고 고주파를 제거하는 필터회로로 구성되며, AMP03 계측 증폭기와 광대역 증폭기로서 LM6365와 저주파 통과 필터를 사용하였다. 그림 5는 IF증폭부의 출력을 5 mV/div으로 측정한 파형으로 진동에 의한 전형적인 간섭파형을 볼 수 있다. 출력의 최대점에서 그 다음 최대점까지의 변위는  $\lambda/2$ 이므로 이것을 이용하면  $\lambda/2$ 의 정수배인 변위를 측정할 수 있으나 분해능이  $\lambda/2$ 에 불과하므로 본 논문에서는 전자계수방법을 사

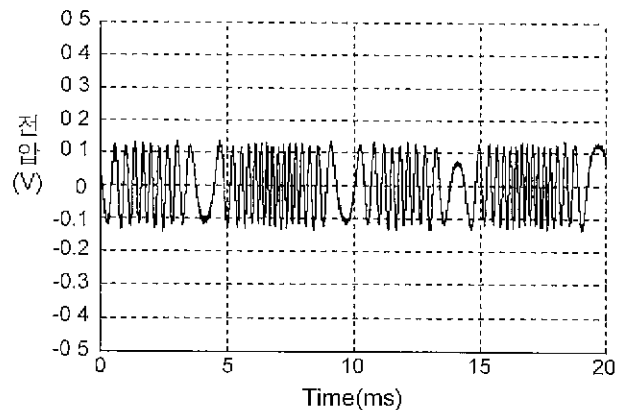


그림 5. RF 증폭부 출력 파형(간섭파형).

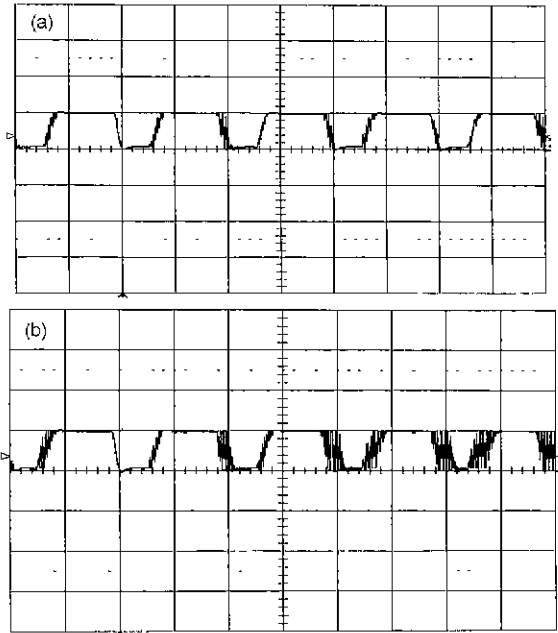


그림 6. (a) 변조신호가 없을 때의 ZCD 출력 파형(수평축: 20 ns/div, 수직축: 5 V/div.), (b) 변조 주파수가 100 kHz이고 최대주파수편이가 80 kHz일 때 ZCD 출력 파형(수평축: 20 ns/div, 수직축: 5 V/div).

용하여 분해능을 대폭 향상하였다.

DPLL에 입력되는 신호는 디지털신호이므로 그림 4에 도시된 것처럼 IF증폭부의 출력을 영점검출기(Zero Crossing Detector, 이하 ZCD)를 통과시켜 디지털신호로 바꾼 후 DPLL에 입력하였다. 그림 6에 변조되지 않았을 경우(a)와 최대 주파수 편이가 80 kHz이고 변조 주파수가 100 kHz인 경우(b)의 ZCD의 출력파형 즉 DPLL 입력 파형을 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 변조신호가 없으면 주파수가 변하지 않는 그림 6(a)의 신호임을 알 수 있고 변조신호가 있는 경우 그림 6(b)의 양끝에서 펄스의 간격이 다르므로 펄스의 주파수가 변하고 있음을 알 수 있고 이로부터 주파수가 변조된 신호임을 알 수 있다.

이와 같이 주파수 변조된 펄스신호로부터 주파수에 비례하는 신호를 출력하는 복조기로서 사용한 DPLL 소자는 FairChild사의 74VHC4046이며, 최대 VCO(Voltage Controlled Oscillator, 이하 VCO) 동작 주파수가 12 MHz이고 검출기의 반응시간은 25 ns이다. 또한 VCO의 선형성과 온도 특성이 우수한 소자이다. DPLL의 출력 파형을 그림 10에 도시하였다.

DPLL의 출력 즉, FM 복조신호는 AD620(계측 증폭기)을 통과하면서 잡음이 제거되고 증폭된다. 증폭된 신호는 세 갈래로 나뉘어지며 첫 번째는 저주파통과 여파기를 통하여 오실로스코프용 출력을 제공하고 두 번째는 ZCD를 통하여 디지털 신호로 변환되어 주파수를 계산하기 위하여 마이크로프로세서에 입력된다. 나머지 한 신호는 OP-37 3개로 조합하여 구성된 계측 증폭기 형태의 복조신호 증폭부로 입력된다. 증폭된 신호는 실효치-직류치 변환기를 통하여 직류 값으로 출력된다. 이 직류 출력전압은 진동표면의 속도에 비례하며 진

폭을 계산하기 위하여 마이크로프로세서로 입력된다.

#### IV. 실험 결과 및 분석

식 (14)에서 알 수 있듯이 DPLL 출력 전압은 변조 주파수와는 관계없이 최대 주파수 편이에 비례한다. 그러므로 최대 주파수 편이가 80 kHz일 때의 출력 전압은 전체 변조 주파수 범위에 걸쳐서 일정하게 40 kHz일 때의 출력전압의 2배임을 그림 7에서 볼 수 있다. 그러나 그림 7에서 볼 수 있듯이 최대 주파수편이가 고정된 경우에도 변조 주파수가 증가함에 따라 출력전압이 조금씩 감소함을 알 수 있는데 이는 신호처리부 회로에 사용된 각종 필터와 증폭기들의 주파수 특성 때문이다.

이러한 현상은 그림 8을 보면 선명하게 드러나는데 그림 8은 각 변조주파수에 대해 최대 주파수편이를 변화시키면서 복조신호의 실효치를 측정된 결과이다. 그림 8에서 변조 주파수가 고주파로 갈수록 DPLL 출력전압은 조금씩 줄어들고 따라서 기울기  $K$ 는 상수가 아니라 변조 주파수에 대한 함수,  $K(f)$ 임을 알 수 있다. 함수  $K(f)$ 를 구하기 위해 그림 8의 각각의 변조주파수에 대한 기울기를 그래프로 그리면 그림 9와 같이 나타나며 함수  $K(f)$ 를 일차함수로 가정하여 최소 제곱법으로 구하면 다음과 같다.

$$K(f) = -8 \times 10^{-5} \times f + 0.0526 \quad (16)$$

그러므로 최대주파수편이는 식 (14)에 의해 다음과 같이 구할 수 있고

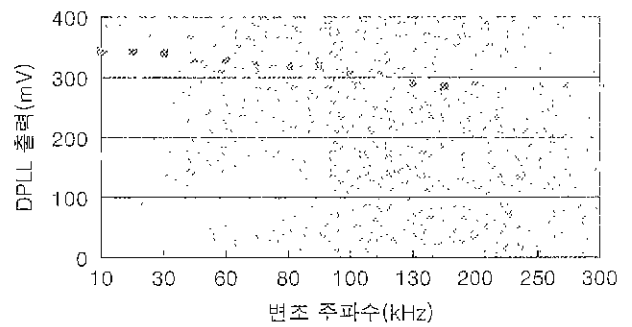


그림 7. 최대 주파수 편이를 고정시키고 변조 주파수를 변화시켰을 때 DPLL 출력전압의 실효값.

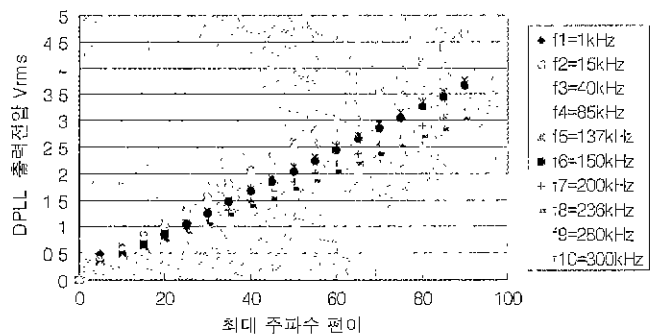


그림 8. 각 변조주파수에 대한 최대 주파수 편이와 출력전압의 관계.

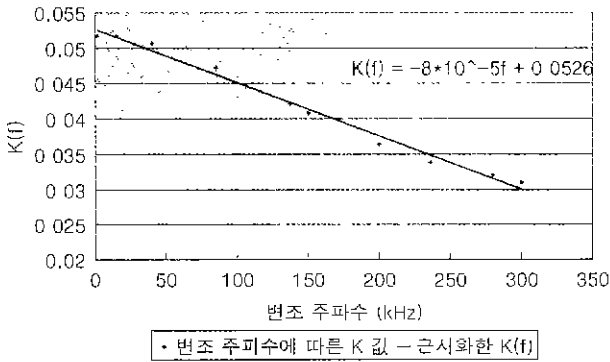


그림 9. 변조 주파수에 대한 시스템 비례상수 K의 관계.

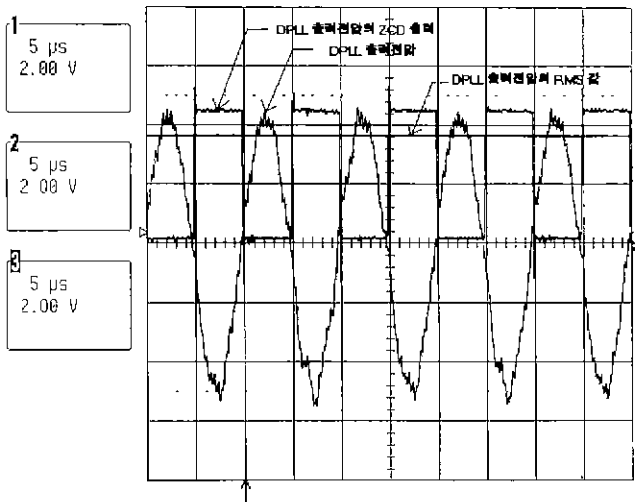


그림 10. DPLL 출력전압, 마이크로 프로세서의 입력인 ZCD 출력 그리고, DPLL 출력전압의 실효치 출력 파형.

$$\Delta f_D = \frac{1}{K(f)} V_{rms} = \frac{V_{rms}}{-8 \times 10^{-5} \times f + 0.0526} \quad (17)$$

진폭 A는 식 (15)에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A = \frac{\lambda}{2 \times 2\pi \times f} \times \frac{V_{rms}}{-8 \times 10^{-5} \times f + 0.0526} \quad (18)$$

본 연구에서는 식 (17)과 식 (18)을 마이크로프로세서에 저장하여 두고 실효치-직류치 변환기의 출력인  $V_{rms}$ 와 마이크로 프로세서에서 측정된 진동주파수  $f$ 를 대입하여 진폭 A를 구하였다. 물론 실효치-직류치 변환기의 입력신호를 BNC 커넥터를 사용하여 오실로스코프로도 관측할 수 있도록 하였다. 최대 주파수 편이가 80 kHz이고, 변조 주파수가 100 kHz일 때 오실로스코프에 나타난 파형을 그림 10에 도시하였는데 전기적 잡음에 의해 파형이 조금 왜곡되었으나 변조주파수 100 kHz를 정확히 추적하고 있음을 알 수 있다. 참고로 실효치-직류치 변환기의 출력, 즉  $V_{rms}$ 와 주파수측정을 위한 ZCD출력을 동시에 측정하여 그림 10에 나타내었다.

이러한 출력으로부터 구한  $V_{rms} = 3.6(V)$ 와  $f = 100 \text{ kHz}$ 를 식 (17)에 대입하여 최대 주파수편이  $\Delta f_D$ 를 구해보면 80.717 kHz이며 실제 입력의 최대주파수편이 80 kHz와 비교할 때 측정 오차는 0.89%이다. 이러한 오차는 함수  $K(f)$ 를 일차함수로 가정하여 근사화하는 과정에서 발생한 것이며 고차함수로 가정하면 오차가 줄어들 것이나 이를 위해서는 고성능의 마이크로 프로세서를 사용해야 한다. 또한 이 경우의 진동의 크기 A를 식 (18)을 사용하여 구해보면 40.6463 nm임을 알 수 있다. 이러한 결과들, 즉 진동의 주파수와 크기를 LCD 표시장치에 나타내면 초음파진동의 특성을 쉽게 알 수 있으며 진동의 특성이 시간적으로 급격히 변할 경우에는 그림 10과 같이 오실로스코프를 사용하면 그 변화를 쉽게 파악할 수 있다.

### V. 결 론

본 연구에서는 초음파영역에서 진동하는 물체의 진동주파수와 크기를 측정할 수 있는 LDV를 DPLL을 사용한 FM복조 방식에 기초하여 설계, 제작하였다. LDV의 출력전압은 이론적으로는 진동주파수와는 무관하고 진동표면의 속도에만 비례하나 실험결과 제작에 사용된 전자부품의 주파수특성에 의해 주파수가 높아질수록 그 크기가 감소함을 발견하였다. 측정된 회로의 주파수 특성을 마이크로프로세서에 저장하여 이러한 현상을 보상하도록 하여 LDV를 제작하였으며 20 Hz에서 300 kHz까지의 가청 및 초음파 주파수 영역에서 10% 이내의 오차를 나타내었고 300 kHz에서 최소 1mm까지의 진동변위를 감지할 수 있었다. 오차는 회로의 주파수 특성을 주파수에 대한 1차식으로 근사화하는 과정에서 발생하였으며 고성능의 마이크로프로세서를 사용하여 고차식으로 근사화하면 이러한 오차를 줄일 수 있다고 사료된다. 본 연구에서 개발된 LDV는 대용량 전기 기기의 부분방전에 의해 발생하는 초음파진동으로부터 초소형 전기 기기의 미세진동까지 측정하는 비접촉식 진동 측정에 사용되리라 사료된다.

### 참고문헌

- [1] A. Lewin, F. Mohr, and H. Selbach, *Technisches Messen* **9**, 335 (1990).
- [2] J. W. Wager, *Physical Acoustics* **19**, 201 (1994).
- [3] J.-P. Monchalin, *IEEE Trans. Ultrasonics UFFC* **33**, 5, 485 (1986).
- [4] 김창현, 김호성, *대한전기학회 논문지* **46**(7), 1115 (1997).
- [5] 김성훈, 고진환, 김호성, *대한전기학회 논문지* **49C**(2), 125 (2000).
- [6] R. S. Sirohi, *Optical Component, System, and Measurement Techniques* (Marcel Dekker, New York, 1991), p. 167, p. 219, p. 370.
- [7] G. M. Miller, *Modern Electronic Communication* (Prentice Hall, New Jersey, 1996), Chap. 5
- [8] S. Haykin, *Communication Systems* (John Wiley & Sons, New York, 1994), Chap 3.

## The development of laser doppler vibrometer using DPLL for the detection of ultrasonic vibration

Myoung Sun Kim, Seung Jong Kim, and Hoseong Kim<sup>1</sup>

*Department of Electrical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, KOREA*

<sup>1</sup>*E-mail: hkim@cau.ac.kr*

(Received January 18, 2000, Revised manuscript received September 5, 2000)

This paper deals with the development of Laser Doppler Vibrometer (LDV) that can measure the frequency and amplitude of the ultrasonic vibration. He-Ne laser (632.8 nm) is used as a light source, and Michelson interferometer in which frequency of the objective beam is shifted by Bragg cell is adopted. The frequency modulated signal centered at 40 MHz from the PIN diode is amplified, down-converted to 2.5 MHz, filtered and digitized. The voltage output that is proportional to the velocity of the vibrating surface is obtained using digital PLL. A microprocessor is used to extract the frequency and amplitude of the vibration from the voltage output. It is found that the developed LDV can measure up to 300 kHz vibration and the minimum measurable amplitude is 1 nm at 300 kHz. We believe that this LDV can be used to measure the vibration of the heavy electric machinery and micro-size structures.

*OCIS code* : 120.7280.