

Development of High Resolution Laser Doppler Vibrometer

金 成 勳* · 高 秦 煥* · 金 鎬 成**
(Seonghoon Kim · Jinhwan Ko · Hoseong Kim)

Abstract - A high resolution Laser Doppler Vibrometer(LDV) was developed using electronic fringe counting method. The fringe pattern signal obtained via analog signal processing is divided into two. One was converted to a TTL signal with a ZCD (zero-crossing detector) and then counted to calculate the displacement due to the vibration. The other was directed to the A/D converter to get a high resolution of about $\lambda/320$ with the phase comparison method. The data obtained with the A/D converter was used in the displacement calculation and the result was displayed on a LCD panel. In this study, a Laser Doppler Vibrometer with measurement range of $0.32\mu\text{m}\sim 129\mu\text{m}$ and displacement resolution of 2nm, about $\lambda/320$, was developed. And this LDV can be used to measure the dynamic response of microsize devices such as MEMS(Micro Electro-Mechanical Systems) and to diagnose high capacity electric equipment such as circuit breakers and transformers, of which resonant frequencies are changed when they are damaged.

Key Words : LDV, high resolution, fringe counting, electronic counting, phase comparison

1. 서 론

최근 들어 전기, 전자, 기계제품들이 소형, 경량, 고급화 되어 가고 있으며 이들의 소음과 고장의 원인이 되는 진동을 측정하기 위해 레이저 도플러 진동계(Laser Doppler Vibrometer, 이하 LDV)가 많이 사용되고 있다. 레이저 도플러 진동계는 빛을 이용하여 진동을 비접촉으로 측정하기 때문에 측정에 수반되는 전자파장애(EMI)가 거의 없고, 속도에 대해 거의 선형적인 출력력을 얻을 수 있으며, 고속 실시간 측정이 가능하고, 먼 곳에서부터 근처의 대상까지 측정거리 범위가 넓으며, 측정단위가 빛의 파장으로 높은 분해능을 얻을 수 있는 등 여러 가지 장점 [16]으로 인해 현재 소형화되어 가는 산업제품의 측정 및 평가에 더욱 많이 사용될 것이며, 특히 최근에 미래기술로 주목받고 있는 MEMS(Micro Electro-Mechanical Systems)분야에서는 그 수요가 급격히 증가하리라 예상된다.

또한 대용량 전력계통의 고장진단 분야에서도 LDV의 응용이 확장되어가고 있는데, 특히 애자나 송전선, 변압기, 차단기 등의 고장진단에도 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 2~3kHz 이며 크랙이 발생한 애자의 고유 진동수는 건전품에 비하여 100~300Hz 정도 저하되며 이러한 변화는 LDV로 충분히 측정할 수 있다[1].

이에 본 논문에서는 현재 전량 수입에 의존하고 있으며 국내에서 거의 연구가 이루어지지 않은 LDV를 구성하고 진동의 변위와 주파수에 관한 정보를 얻는 신호처리방법을 연구하였다.

진동하는 물체에 의해 반사되는 빛의 주파수는 도플러효과에 의해 진동하는 물체의 속도에 비례하여 주파수가 천이된다. 그러므로 진동주파수는 반사광의 주파수의 변화율을 이용하여 측정할 수 있으며, 진동의 크기는 천이된 주파수에 비례하는 속도를 적분하여 구하거나 간섭계에 의해 발생하는 간섭파형(fringe pattern)의 간섭파의 수를 세어 변위를 측정할 수 있다[4][10]. 속도를 적분하여 진동의 크기를 측정하는 방법은 전자회로의 부품과 그 온도특성에 영향을 많이 받으므로 간섭파의 수를 세는 간섭파 계수법(fringe counting)이 많이 쓰인다.

국내에서 시행되었던 연구에서는 단순히 간섭파의 최대점의 수를 세어 $\lambda/2$ 의 변위 분해능을 얻었으나[2] 본 연구에서는 분해능 $\lambda/100$ 이상의 고 분해능 레이저 도플러 진동계의 개발을 위해 디지털 신호처리 방법으로 반파장의 분수배에 해당하는 부분을 A/D 변환을 통해 계산하는 방법(electronic fringe counting)을 이용하였으며 그 결과가 LCD에 표시되도록 하였다.

*正 會 員 : 中央大 工大 電氣工學科 碩士課程

**正 會 員 : 中央大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 9月 2日

最終完了 : 2000年 1月 14日

2. 본 론

2.1 이론 및 시뮬레이션

그림 1의 LDV의 구성도와 같이, He-Ne 레이저광은 빔살 가르개 1에 의해 기준광과 측정광으로 각기 나뉘어진다. 브래그셀(Bragg cell)을 통과한 측정광은 40MHz의 주파수 천이가 일어나게 되며 이 측정광은 빔살가르개 2를 지나 렌즈에 의해 측정하려는 물체에 입사된다. 측정광은 진동하는 물체, 본 실험에서는 가청주파수발생기에 의해 구동되는 스피커에 의해 반사되고 다시 빔살가르개 2, 3을 거쳐 기준광과 합쳐지게 된다. 렌즈는 반사된 빛의 산란 손실을 최소화하고, 반사된 빛의 파동전면의 왜곡을 최소화하기 위해 사용되었다[4]. 이렇게 합쳐진 두 빛은 간섭을 일으키게 되고 이 빛은 응답속도가 빠른 PIN 광검출기를 통해 광 신호로부터 전기적인 신호로 바뀌어진다.

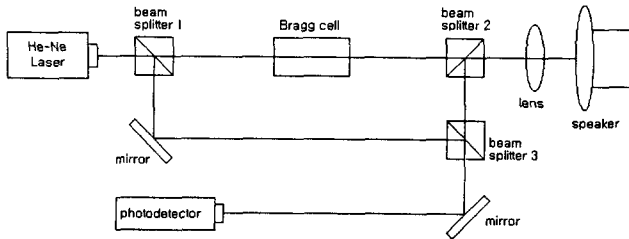


그림 1 레이저 도플러 진동계(LDV)의 광학부 구성도
Fig. 1 Schematic diagram of LDV optical arrangement

기준광 E_1 과 측정광 E_2 를 다음 식과 같이 표현하고,

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

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

ω : 레이저의 주파수

ω_B : 브래그셀에 의한 주파수천이

$\delta(t)$: 진동에 의한 위상 변화

가청주파수 발생기에 의해 구동되는 스피커의 변위 $S(t)$ 를 다음과 같이 표현하면,

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

A : 진폭

ω_S : 진동주파수

이때의 진동에 의한 위상변화는 다음과 같다.

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

이때, 광검출기의 출력전류는

$$I(t) = I_{DC} + I_0 \cos(\omega_B t + \delta(t)) \tag{5}$$

으로 표현되며, 식(4)를 식 (5)에 대입하고 직류성분을 제외한 교류성분만을 측정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.[2]

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

signal 주파수는 위 식에서 위상을 시간에 대해 미분하면 구해지므로

$$f(t) = f_B + \frac{2}{\lambda} v(t) \tag{7}$$

와 같이되고 여기서 $v(t)$ 는 거리 $S(t)$ 를 시간에 대해 미분한 속도이다. 식 (7)을 보면 주파수는 f_B 에 대하여 $\frac{2}{\lambda} v(t)$ 만큼 주파수 천이가 일어났음을 알 수 있고 f_B 를 중심주파수로 하고 속도에 의한 $\frac{2}{\lambda} v(t)$ 만큼 FM변조된 신호임을 알 수 있다. 이렇게 다가오는 물체나 멀어지는 물체에 의해 빛이 반사되어 나올 때에 주파수 천이가 일어나는 현상이 도플러효과이다[3][4]. PLL을 사용하여 FM신호를 복조하였을 때의 출력전압은 식(7)의 주파수 천이에 비례하므로 교류성분만을 취하면 다음과 같다[2].

$$V_{AC}(t) = K \frac{2}{\lambda} v(t) \tag{8}$$

위 식에서 K는 PLL 특성에 의해 결정되는 비례상수이다. 그러므로 스피커의 속도는

$$v(t) = \frac{\lambda}{2K} V_{AC}(t) \tag{9}$$

과 같이되고, 이를 적분하면 진동의 크기는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_s = \int_{t=0}^T \frac{\lambda}{2K} V_{AC}(t) dt \tag{10}$$

식 (10)을 보면, 속도를 적분하여 구하는 진동의 크기가 비례상수 K의 값에 의해 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그런데 K는 PLL 시스템 전체의 이득이나 주위의 온도에 따라 크게 변하기 때문에 측정되는 진동의 크기의 신뢰도가 떨어진다.

이러한 문제를 해결하기 위해 일반적으로 간섭파의 수를 측정하여 진동의 크기를 구한다. 광검출기의 출력 신호인 식(6)에서 ω_B 를 제거한 식(11)을 이용하여 시뮬레이션을 하면 그림 2의 간섭파형으로 나타나는데, 진동하는 물체의 속도에 의한 도플러 효과에 따라 빛의 세기가 다음과 같이

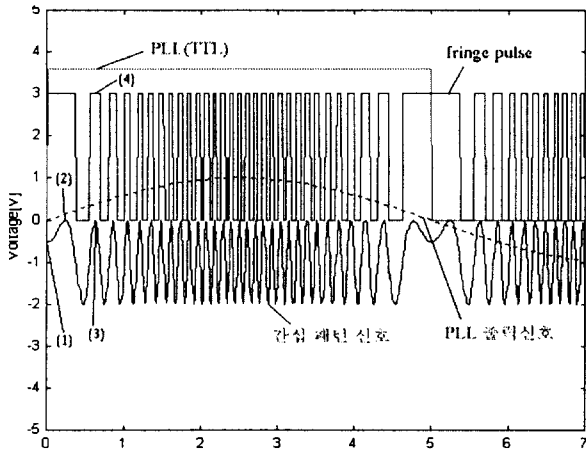


그림 2 간섭신호 파형에서의 변위 계산
Fig. 2 Calculation of displacement with fringe pattern signal
변화하는 것을 알 수 있다.

$$I(t) = I_0 \cos\left(\frac{4\pi A_s}{\lambda} \cos w_s t\right) \quad (11)$$

이 때 그림 2의 간섭파형에서 빛의 세기가 최대인 두 점간의 거리는 $\lambda/2$ 가 된다.

그림 2에서 스피커의 속도에 비례하는 PLL출력신호가 0이 되는 순간을 $t=0$ 이라 하면 진동의 크기 A_s 는 식 (11)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{4\pi A_s}{\lambda} = \cos^{-1}\left\{\frac{I(t)}{I_0}\right\} = 2n\pi \pm \theta \quad (12)$$

$$A_s = \frac{\lambda}{4\pi}(2n\pi \pm \theta) = \frac{\lambda}{2}\left(n \pm \frac{\theta}{2\pi}\right)$$

간섭파의 수 N 은 그림2에서와 같이 간섭파형을 디지털화한 펄스의 수를 이용하여 구할 수 있으며 속도 신호인 PLL 출력신호를 디지털로 변환시킨 TTL신호를 계수기의 시작(counter enable) 신호로 사용한다.

보통의 경우 진동의 크기를 구할 때 $\pm \frac{\theta}{2\pi}$ 를 무시하고 간섭파의 최대점의 개수만을 측정하는데 이런 방법으로 진동의 크기를 측정할 경우 분해능은 $\frac{\lambda}{2}$ 가 된다. 분해능을 향상하기 위해서 식 (12)의 $\pm \frac{\theta}{2\pi}$ 를 계산하게 되는데, 그 값은 A/D 변환기를 사용하여 측정되는 $t=0$ 일때의 $I(0)$, $I''(0)$, I_0 의 값을 이용하여 구할 수 있다. 이렇게 계산하는 경우 진동의 크기 A_s 는 다음 4가지 경우로 구분하여 구할 수 있다.

① $I(0) > 0, I''(0) > 0$ 일 때

$$A_s = \frac{\lambda}{2}\left(\frac{N}{2} + \frac{\theta}{2\pi}\right) \quad (13)$$

② $I(0) > 0, I''(0) < 0$ 일 때

$$A_s = \frac{\lambda}{2}\left(\frac{N}{2} - \frac{\theta}{2\pi}\right) \quad (14)$$

③ $I(0) < 0, I''(0) > 0$ 일 때

$$A_s = \frac{\lambda}{2}\left(\frac{N-1}{2} + \frac{\theta}{2\pi}\right) \quad (15)$$

④ $I(0) < 0, I''(0) < 0$ 일 때

$$A_s = \frac{\lambda}{2}\left(\frac{N+1}{2} - \frac{\theta}{2\pi}\right) \quad (16)$$

이상과 같이 간섭파형의 위상을 해석함으로써 A/D 변환기의 성능에 따라 $\lambda/100$ 에서부터 $\lambda/1000$ 까지의 고 분해능을 얻을 수 있다[16].

2.2 LDV의 구성

2.2.1 LDV의 광학 부

본 연구에서 개발한 LDV의 광학부 구성도는 그림 1 LDV의 구성도에 보인 것과 같다. 기준광은 왼쪽의 반사경만을 조정함으로써 광검출기에 입사하는 빛을 조절할 수 있기 때문에 먼저 조정이 어려운 측정광의 경로를 조정한 후에 기준광을 조정하여 광 경로를 일치하게 하였다. 그리고, 광검출기로 입사되는 기준광과 측정광의 간섭경로를 가능한 한 같게 하면, 즉 광 경로 차를 가능한 한 작게 하면 측정신호를 깨끗하고 크게 할 수 있다[3,4].

2.2.2 신호처리부

2.2.2.1 아날로그 신호처리부

다음 그림 3은 광학 부에서 측정된 신호의 처리단계를 나타낸 블록도 이다.

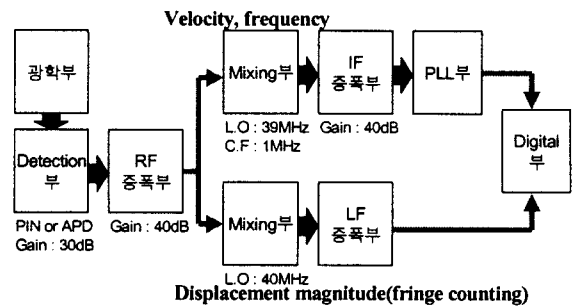


그림 3 LDV 시스템의 블록도
Fig. 3 Block diagram of LDV system

광학 부에서 측정된 신호를 처리하는 단계는 다음과 같다 [4][12]. 광검출부는 스피커의 진동에 의해 도플러천이 된 광 신호를 40MHz를 중심 주파수로 하고 도플러천이에 의해 FM변조된 전기적 신호로 바꾸는 회로이다. 디텍터로는 Hamamatsu사의 PIN 광검출기(S2839)를 광전도모드(photo-conductive mode)로 사용하였고, 증폭기로는 AD849를 사용하였으며 40MHz에서 30dB의 이득을 가진다.

RF증폭부는 광검출부의 출력을 40dB 정도 증폭하는 회로이며, Philips 사의 NE5204A 증폭기를 사용하여 2단 증폭하였다. RF증폭부의 출력은 속도와 주파수 측정 신호를 얻

는 블록과 진동 변위측정용 신호를 얻는 블록으로 나누어진 다.

속도와 주파수 측정 블록에서는 주파수변환부에서 39MHz의 출력을 갖는 수정발진기와 AD834 곱셈기를 사용하여 중심 주파수가 40MHz인 RF부의 출력신호를 중심주파수가 1MHz인 IF신호로 주파수를 낮추는 회로로써 중심주파수를 1MHz로 하여 진동의 방향을 구분하고 PLL에서의 신호복원을 빠르게 하였다. AD834의 전류 출력을 전압 신호로 바꾸기 위해 AD620 계기용 증폭기(Instrumentation Amp, 이하 IA)를 사용하였다.

IF증폭부는 주파수변환기의 출력을 증폭하고 고주파를 제거하는 회로이며, 증폭기로서 national사의 LM6365와 쌍신사의 LO213 저주파통과필터를 사용하였다. LO213 저주파통과필터는 차단 주파수가 10MHz이고 20MHz이상의 영역에서는 30dB 이상의 감소율을 가지므로 주파수변환 후에 생기는 불필요한 40MHz와 그 고조파 성분을 제거하여 PLL 입력에서의 잡음을 줄인다.

PLL부는 IF신호에서 속도에 비례하는 도플러천이주파수를 검출하는 회로이며 NE564 PLL chip을 사용하였고, 출력은 VCO의 무신호(free running)주파수 1MHz와 IF신호 주파수와의 차이에 비례하는 전압이다. PLL에서 복원된 속도 신호는 계수기작동과 주파수 측정에 사용된다.

진동 변위측정(fringe counting)부에서는 40MHz의 발진 주파수를 갖는 수정발진기와 주파수변환기를 사용하여 간섭파형만을 추출하여 증폭을 거쳐 간섭파의 수를 세도록 사용하도록 하였다. 디지털부는 간섭파형과 속도신호를 TTL 신호로 변환하여 진동 변위와 주파수를 구하는데 사용한다.

2.2.2.2 디지털 신호처리부

디지털부에서는 간섭파형과 속도 신호를 TTL 신호로 변환하고 Intel사의 80196kc 마이크로프로세서를 사용하여 진동 변위와 주파수를 구하였다. 그림 4는 앞의 그림 3의 아날로그 신호처리부 블록도에 나타난 디지털부에 해당하는 부분으로 간섭파의 수를 세어 변위를 구하는 회로의 블록도이다. 그림 4의 PLL부의 출력신호, 즉 속도에 비례하는 신호는 그 크기가 최대 600mV 정도로 직접 zero crossing 하기에 충분하지 못하고, noise 성분으로 인해 zero crossing할 때 오차의 원인이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해, PLL 출력 신호는 AD620 IA(Instrumentation Amplifier)에서 증폭되고 noise가 제거된 후 ZCD(Zero Crossing Detector)에서 TTL 신호로 변환된다. ZCD로는 AD790 비교기를 사용하였는데, AD790은 schmitt trigger를 내장하여 잡음의 영향을 줄이고 TTL 호환 출력을 얻을 수 있다. ZCD에서 변환된 TTL신호는 마이크로프로세서의 계수기로 보내진다. 이 신호는 마이크로프로세서에서 계수기작동 신호와 주파수 측정 신호로 사용된다. 또한 PLL출력에서 직접 아날로그 출력도 얻을 수 있도록 하였다.

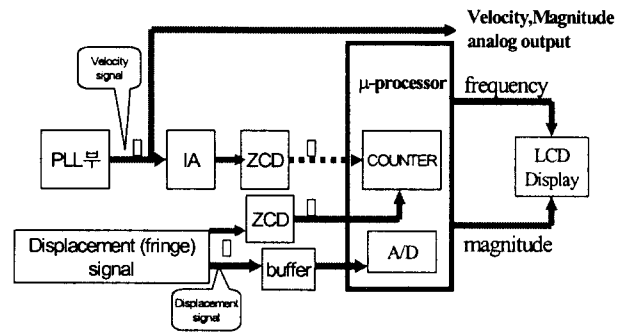


그림 4 디지털 간섭파계수부의 블록도
Fig. 4 Block diagram of digital fringe counting unit

그림 4의 변위측정(fringe counting)부 출력신호인 간섭파형은 ZCD와 A/D 변환기로 입력된다. ZCD에서 이 신호는 TTL 신호로 변환되어 마이크로프로세서의 계수기에 입력되어 간섭파의 수를 세고 반파장의 분수배에 해당하는 부분을 고려하기 위해 A/D 변환기를 통해 A/D 변환하였다. A/D 변환기에 입력되는 간섭파형은 버퍼를 거쳐 ZCD에 입력되는 신호에 영향을 주지 않도록 하였고, A/D 변환기의 입력 범위인 0~5V에 들도록 DC성분을 조정하였다. 마이크로프로세서에서 계수기의 출력과 A/D 변환한 데이터를 이용하여 진동 변위와 주파수를 구하고 그 결과가 LCD에 표시되도록 하였다.

2.3. 실험 결과1

2.3.1 아날로그 신호처리부 측정 결과

다음은 스피커의 입력주파수를 100Hz로 고정하고 실험한 결과이다.

그림 5는 RF증폭부의 출력을 주파수 분석기로 본 것인데, 중심주파수가 40MHz이고 변조폭이 물체의 속도에 비례하는 FM변조된 신호를 관측할수 있다. 그림 6은 RF증폭부의 출력에서 40MHz의 중심주파수를 없앤 LF증폭부의 출력

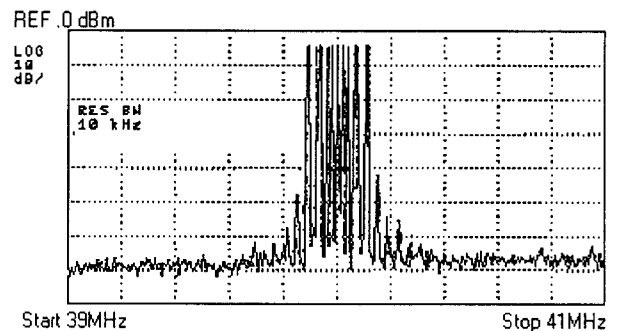


그림 5 RF증폭부 출력 신호의 스펙트럼
Fig. 5 Spectrum of output signal of RF amplifier unit

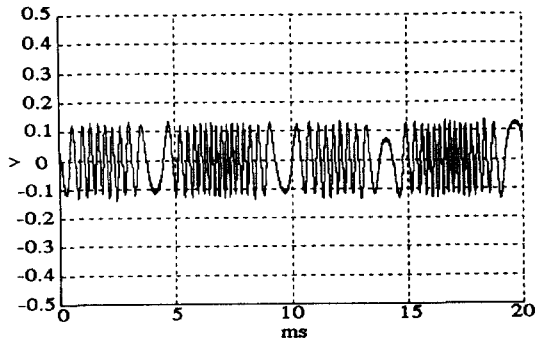


그림 6 LF증폭부 출력 파형(간섭파형)
Fig. 6 Waveform of output signal of LF amplifier unit (fringe counting)

을 관측한 것인데, 전형적인 간섭파형(fringe pattern)을 볼 수 있다.

그림 7은 PLL부의 출력을 오실로스코프를 통해 측정된 결과로 그 주파수는 스피커의 입력주파수와 같은 100Hz로 입력신호가 복원된 것을 알 수 있으며, 스피커의 입력신호의 크기를 증감하면 출력전압의 크기도 비례하여 증감함을 확인할 수 있다

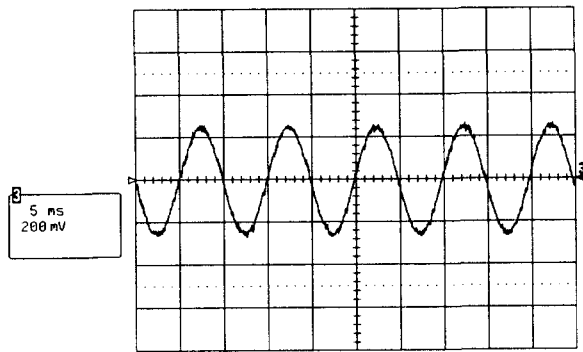


그림 7 속도에 비례하는 PLL출력신호
Fig. 7 PLL output signal proportional to velocity

2.3.2 디지털 신호처리부 측정 결과

2.3.2.1 간섭파형의 해석

그림 8은 디지털부에서 측정한 각 블록에서의 출력신호이다. 파형 1은 PLL 출력신호로써 영점검출기(zero crossing detector)에서 파형 2와 같은 TTL 신호로 변환된다. 이 신호는 계수기 시작신호로 사용되었다. 파형 3은 RF증폭부의 출력신호와 40MHz 국부 발진기(local oscillator)의 신호를 곱하여 얻은 간섭파형인데 영점을 검출을 하여 파형 4와 같은 TTL 신호를 얻었다. 그림 8의 파형이 그림 2의 시뮬레이션과 잘 일치함을 알 수 있고 회로가 설계한대로 동작함을 확인할 수 있으며 파형 4의 펄스의 수를 세어 마이크로프로세서에서 변위를 구하고 LCD로 표시하였다.

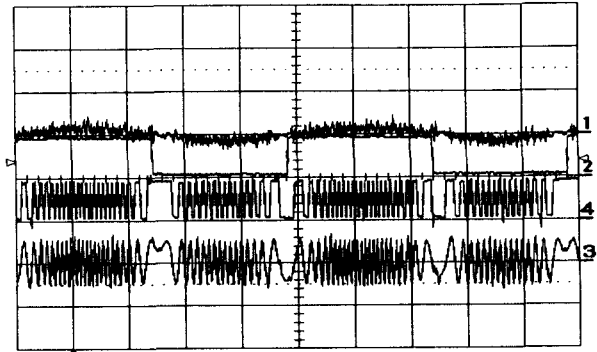


그림 8 digital 부 각 블록에서의 출력신호
Fig. 8 Output signals of each blocks of digital unit

파형 1과 3을 보면 시뮬레이션에서와 같이 파형 1의 PLL 출력신호가 영을 지나는 점, 즉 속도가 영인 점에서 파형 3의 간섭파형에서 파의 수가 가장 적고 속도가 최대인 점에서 간섭파의 수가 가장 많은 것을 볼 수 있다. 따라서 파형 1의 속도 신호에서 속도가 영인 점에서 다시 영으로 되는 점 사이동안의 간섭파의 수를 세면 스피커의 진동 변위를 구할 수 있다. 즉, 파형 2의 TTL 신호가 high인 동안 파형 4의 펄스 수를 세어서 변위를 구하였다.

2.3.2.2 분해능의 개선

그림 9는 간섭파형에서 변위를 구하는 방법을 보이기 위해 시간 축을 확대하여 측정한 것으로 그림 2의 시뮬레이션과 일치하는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션에서 설명한 것처럼 분해능을 $\lambda/2$ 이상의 분

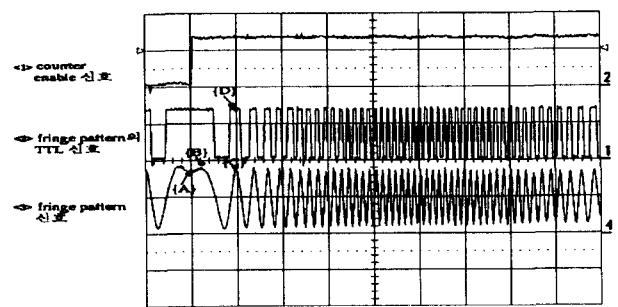


그림 9 fringe pattern 신호에서의 변위 계산
Fig. 9 Displacement calculation with fringe pattern signal

해능을 얻기 위해 <3>의 간섭파형을 A/D 변환하여 (A)점과 (B)점의 값을 구하여 (A)~(B)점간의 변위를 구하였다. 그림 10은 간섭파형을 A/D 변환한 결과를 보여주는데, 그림에서 (A), (B)점에 해당하는 A/D변환 데이터를 이용하여 (A)~(B)점간의 변위를 구하였다.

본 연구에서 간섭파 계수법을 이용하여 측정할 수 있는 최대 변위는 $129.073\mu\text{m}$, 또 speaker 입력 신호를 최소로 놓

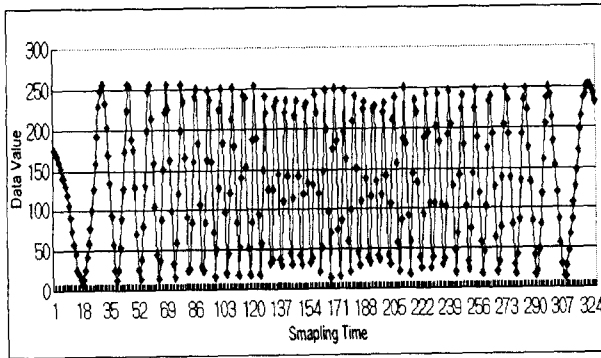


그림 10 fringe pattern 신호의 A/D 변환 결과
Fig. 10 Result of A/D conversion of fringe pattern signal

있을 때의 최소 측정 변위는 $0.32\mu\text{m}$ 이고, 변위의 분해능은 $\lambda/320$ 이었다.

B&K 4809 가진계(vibration exciter)를 진동시켰을 때, 상용의 외국제품과 본 연구에서 제작한 LDV를 이용하여 가진계의 진동을 측정된 결과 1%이하의 오차가 있었으며 오차가 생기는 원인으로는 다음과 같은 것들이 있다. 첫째, 신호처리 단계에서 사용된 발진기 주파수의 미소한 차이에 의해 간섭파형에 생기는 간섭파의 수가 달라질 수 있기 때문이고, 둘째, 실험장치의 구성상 외국제품과 본 연구에서 제작한 LDV로 동시에 측정할 수 없어서 진동 물체의 위치를 바꾸어 측정하였기 때문에 측정위치의 차이에서 생기는 오차와 함수발생기를 이용하여 가진계를 진동시킬 때 물체의 진동에도 시간에 따른 변화가 있을 수 있기 때문에 측정 시각이 다른데서 생기는 오차 때문이라고 사료된다.

2.3.3 주파수 측정 결과

진동에 의한 주파수의 측정은 PLL에서 복원된 진동신호(그림 7)인 PLL 출력신호의 주파수를 측정하여 구할 수 있으며 그림 9에서 보인 것처럼 PLL 출력신호가 0보다 큰부분의 TTL신호(그림 9의 파형 2)가 high인 시간동안 마이크로프로세서의 내부 클럭 펄스의 수를 세어 구하였다.

주파수 측정결과 50kHz까지 스피커진동 주파수를 측정할 수 있었으며 측정오차는 0.1%이었다. 그 이상의 주파수에서는 정확한 측정이 어려웠는데 그 원인은 신호의 주파수가 높아질수록 출력신호의 크기가 작아 지고 잡음의 영향으로 PLL 출력신호를 TTL 신호로 정확하게 변환할 수 없기 때문이다. 따라서, 정확한 주파수의 측정과 주파수 측정 대역폭을 향상시키기 위해서는 아날로그 신호처리 단계에서부터 잡음제거를 확실히 하는 것이 필요하다.

그림 11은 측정결과의 사진으로 간섭파의 수가 50이고, 이 때 변위는 $7.85\mu\text{m}$, 주파수는 100Hz인 것을 보여주고 있다.

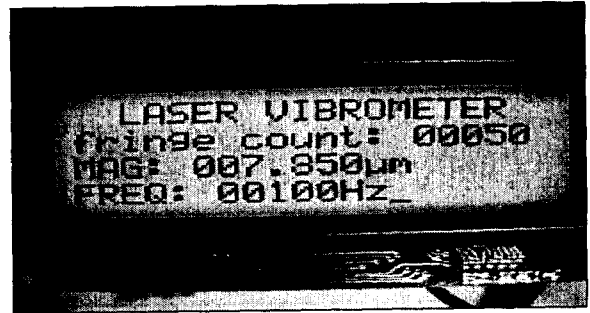


그림 11 측정 결과가 LCD에 display된 사진
Fig. 11 Figure of measurement result displayed on LCD

3. 결론

본 연구에서는 물체의 공진 주파수와 진동의 변위를 측정할 수 있는 레이저 도플러 진동계(Laser Doppler Vibrometer)를 설계, 제작하고 실험하였다. 진동의 방향을 구별하고 높은 S/N비를 얻기 위해 측정광의 주파수를 Bragg cell을 이용하여 40 MHz 천이하였으며 도플러효과에 의해 주파수가 천이된 측정광과 기준광의 간섭신호를 광디텍터에 집속하였다. 주파수변조된 광검출기의 출력을 주파수변환기를 사용하여 주파수를 낮추었으며 PLL회로를 이용하여 복조하였다. 높은 분해능을 얻기 위해 간섭파형을 디지털로 변환하여 전자식 간섭파 계수법 (electronic fringe counting method)으로 알고리즘을 개발하고 구현하였다. 단순히 간섭파의 수를 세는 방법을 적용하면 $\lambda/2$ 의 분해능만을 얻을 수 있지만, 본 연구에서는 반파장의 분수에 해당하는 부분을 A/D 변환을 통해 변위계산에 포함시킬수 있어 $0.32\mu\text{m} \sim 129.073\mu\text{m}$ 의 측정 범위(입력주파수 100Hz일 때)와 2 nm, 즉 $\lambda/320$ 의 분해능을 얻을 수 있었다.

진동의 주파수는 0.1%의 정확도로 50kHz까지 측정할 수 있었으며 진동의 주파수가 50kHz 이상일 경우에는 본 연구에서 사용한 PLL의 특성과 filter의 특성에 의해 출력신호의 크기가 매우 작아서 측정이 불가능하였다. 동급의 외국 상용제품과 비교하면 상용제품의 분해능이 80 nm인 것에 반해 본 연구의 시제품의 분해능은 2 nm에 달해 우수한 특성을 나타내었으며 오실로스코프를 이용하여 변위를 계산하는 상용제품에 비해 본 시제품은 LCD에 측정결과가 표시되어 사용이 편리하다는 장점이 있다. 측정 가능한 진동의 최대 크기가 수십 mm에 달하는 상용제품도 있으나 이 경우 분해능이 저하되어 외국 상용제품도 근거리용, 원거리용, 그리고 저주파용과 고주파용 진동측정기를 분리하여 제작, 판매되고 있으며 이런 의미에서 저가격의 광대역 진동측정방법의 개발은 충분한 연구대상이 되리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1998년 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학 공동연구소 주관으로 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, pp.1115~1119, 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.Spenner, "Sensors (Vol. 6 Optical sensor)", pp.315~316, 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.
- [6] J.M.Rueger, "Electronic Distance Measurement", Springer, pp.23~29, 1996
- [7] Nicusor Iftimia, Mircea Mujat, Aurelian Stoica, Virgil Vasiliu and Ileana Iftimia, "Measurement of Parasite Doppler Effect in Radar Systems using Laser Heterodyning Techniques", SPIE Vol.2868, pp30~36, 1996
- [8] Ivan Andonovic and Deepak Uttamchandani, "Principles of Modern Optical Systems", Artech House, pp.120~123, 1989
- [9] A. Sona, "Lasers in Metrology", North-Holland Publishing Company, pp.1463~1469, 1972
- [10] James T. Luxon and David E. Parker, "Industrial Lasers and Their Applications", Prentice Hall, pp.186~191, 1992
- [11] R. J. Klaiber, "Interferometry and Holography(Lasers in Industry)", Western Electric Company, pp.438~439, pp.524~525, 1972
- [12] V. Handerek, "Single mode optical fiber sensors(Optical Fiber Sensor Technology)", Chapman & Hall, pp.211~212, 1995
- [13] Roland E. Best, "Phase-Locked Loops design, simulation, & applications", McGraw-Hill, pp.32~39, 1997
- [14] Philips, Semiconductor RF Communication Products NE564, 1996
- [15] Cyril M. Harris, "Shock and Vibration Handbook", McGraw-Hill, pp18.14~18.16, 1961
- [16] 이 봉훈, "센서 사전", 세화, pp.357~362, pp.385, pp.389~392, 1998
- [17] 김성훈, 김호성, "레이저 도플러 진동계를 이용한 진동변위와 주파수 측정방법 연구", '98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1984~1827, 1998
- [18] 김성훈, 김호성, "레이저 진동계를 위한 신호처리 방법 연구", 제 13회 파동 및 레이저 학회 논문집, pp.26, 1998

저 자 소 개



김 성 훈 (金 成 勳)

1971년 12월 5일 생. 1996년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1997년~1999년 동대학교 대학원 졸업 현재 LG정밀근무
Tel : 0331-2889-139
E-mail : shking@lgp.co.kr



고 진 환 (高 秦 煥)

1977년 8월 19일 생. 1999년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1999년 - 현재 동대학원 석사과정
Tel : 02-824-5816
E-mail : genichin@ms.cau.ac.kr



김 호 성 (金 鎬 成)

1957년 10월 11일생. 1980년 서울대학 전기공학과 졸업. 1982년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 SUNY at Buffalo 공학박사. 1983년~1986년 금성 전기 기술 연구소. 1993년~현재 중앙대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 02-820-5292
E-mail : hkim@cau.ac.kr