

레이저 도플러 간섭계를 이용한 진동 측정에 관한연구

김창현, 김호성
중앙대학교 전기공학과

A study on the measurement of vibration using Laser Doppler Interferometer

Changhyun Kim , Hoseong Kim
Dept. of Electrical Eng. Chung Ang Univ

Abstract. Laser Doppler Vibrometer using heterodyne method with a 632.8 nm He-Ne laser , has been developed for the measurement of small displacement and velocity. The measurement uses heterodyne method can be made insensitive to undesired vibration effect acting the system and can yield the sign of Doppler shift at the expense of increased complexity. A Bragg cell gives a frequency shift of 40MHz for heterodyne method. Frequency Modulated output is detected by spectrum analyzer.

1. 서론

최근 들어 전력계통의 고전압화와 함께 전력기기도 고전압화 대응량화하고 있으며 전력용 기기의 사고시 수용가에 미치는 영향이 막대하므로 사고를 예방하기 위한 보수 관리 및 절연 진단의 필요성이 점차 증가하고 있다. 또한 계통의 원활한 운용을 위하여도 전력 설비의 예방 진단 기술이 요구되고 있다.

변압기 , 여자 , 차단기등의 단위기기 진단법 중 부분방전법, 유증가스 분석법등은 이상발생시 일정 시간이 경과한 후에 검출이 가능하며 Noise 또는 Surge로 인해 진단기능을 다 발휘하지 못하게 된다. 기존의 electro-mechanical transducer를 이용하는 진동측정방법도 부차적으로 인해 발생하는 정밀 측정의 오차와 전자유도장에 (Electro-magnetic interference)문제 때문에 정확한 측정이 어렵다는 문제가 있다.

또한 최근에 컴퓨터용 HDD, CDP, LPD ,VCR 등에 사용되는 pickup의 크기가 급격히 작아지고 있어 그것들의 정확한 성능평가를 하는 것이 심각한 문제가 되었다.

이에 비하여 EMI에 강한 빛의 특성을 이용하며 측정단위기 빛의 파장이므로 high resolution 을 얻을 수 있고, 진동표면에서부터 멀리 떨어진 거리에서도 측정이 가능하며, 비접촉식으로 측정하므로 접촉식으로 측정 불가능한 응용에 적용할 수

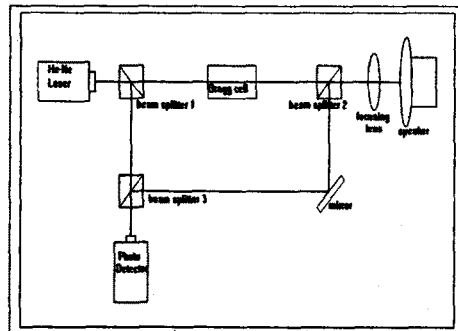
있는 레이저 도플러 간섭계를 이용한 진동측정에 대한 관심이 높아지고 있다.

레이저 도플러 진동계는 센서부와 측정체의 거리를 렌즈의 초점거리 조정으로 수 cm 부터 수십 m 까지 자유롭게 조절할 수 있으며 , system 구성에 따라 큰 signal bandwidths와 wide ranges 의 측정이 가능하다.

이러한 장점때문에 음향기기, 자동차, 정밀기계 등 각종 정밀 진동측정 및 비접촉 진동측정에의 적용도 증가하고 있다.

본 논문에서는 고장 및 열화에 의해 발생하는 전력기기의 초음파 진동을 측정하기 위한 레이저 도플러 진동계의 제작 및 기초 실험에 관해 서술하고자 한다.

2.본론



-그림 1 : 본 연구의 system 블록도

그림 1의 연구 장치 블록도와 같이 , He-Ne laser beam은 beamsplitter 1에 의해 reference beam과 object beam 으로 각기 나뉘어진다. bragg cell을 통과한 object beam은 40MHz 의 주파수 천이가 일어나게 되며 이 object beam은 beamsplitter 2를 지나 focusing 렌즈에 의해 측정하려는 물체에 입사된다. object beam은 진동하는 물체, 본 실험에서는

audio generator에 의해 구동되는 스피커에 의해 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 광신호로부터 전기적인 신호로 바뀌어진다.

reference beam E1과 object beam E2를 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

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)는 다음과 같다.

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

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 출력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I \propto |E|^2 &= |E_1 + E_2|^2 \\ &= |E_1 \cos \omega t + E_2 \cos [(\omega + \omega_B)t + \delta(t)]|^2 \\ I &= I_0 [1 + \cos(\omega_B t + \delta(t))] \end{aligned} \quad (5)$$

식 (3)와 식(4)를 식 (5)에 대입하고 직류성분을 제외한 교류성분만을 추정하면 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.

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\omega_B t + \frac{4\pi A \cos \omega_S t}{\lambda} \right) \\ &= \omega_B + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial S(t)}{\partial t} \\ &= \omega_B + \frac{4\pi}{\lambda} V(t) \end{aligned} \quad (7)$$

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 Doppler effect라 한다.

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

이러한 heterodyne interferometer는 2개의 다른 주파수를 갖는 wave를 사용하는 방법이며, homodyne method에 비해 다소 복잡한 구조이기는 하나 식 (8)에서와 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 있으며 homodyne method와는 달리 higher accuracies를 얻을 수 있고 low level backscattered beam에 대해서도 측정할 수 있다.

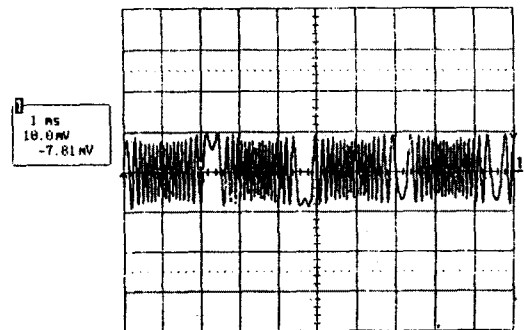
본 연구에서는 다중 주파수 레이저를 사용하는 대신에 단일 주파수 레이저를 사용하였고 대신 Bragg cell을 이용하여 object beam을 40MHz 주파수 천이하여 실험을 하였다.

이 연구에서는 기존의 sensing 뿐만 아니라 electronic signal processing에 의한 signal bandwidth와 range의 조정을 고려하여 실험하였다.

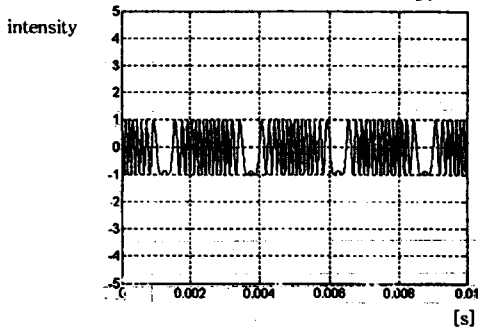
아래 그림 2는 Bragg cell에 의한 40MHz의 주파수 천이 없이 스피커에 주파수가 ω_S 인 신호를 입력한 후 측정된 파형이다. 식 (5)에서 예상했던 것과 같이 주파수 modulation된 파형이라는 것을 알 수 있다.

이 경우 물체가 가까워지는 멀어지는지를 판단할 수 없다.

그림 3은 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $\omega_S = 200 \text{ Hz}$ 의 값을 이론해석에서 구한 식 (5)에 대입한 simulation 파형이다. 이때의 진폭 A는 측정파형과 simulation파형을 맞추기 위해 추정된 값이다.



-그림 2 : $\omega_B = 0$, $\omega_S = 200 \text{ Hz}$ 일 때 output 파형



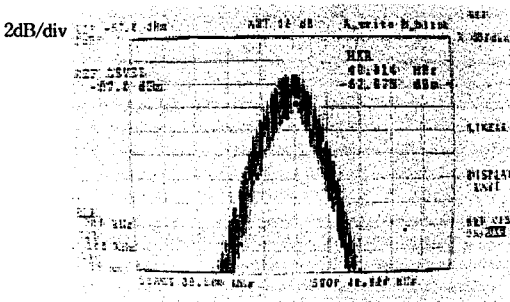
-그림 3 : $\omega_B = 0$, $\omega_S = 200$ Hz, $A = 4.8 \mu\text{m}$ 로 추정했을 때의 simulation 파형

그림 4는 object beam에 Bragg cell에 의한 40MHz의 주파수 천이가 있고 스피커의 입력 신호의 주파수가 ω_S 가 없는 주파수 변화가 일어나지 않는 경우에 대한 spectrum 분석파형이다.

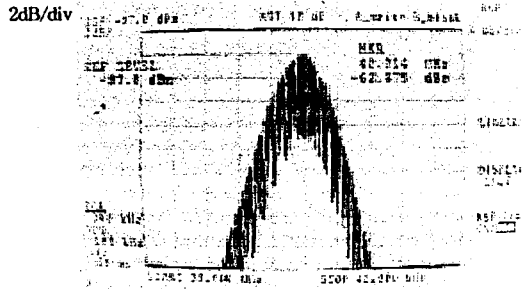
그림 5는 object beam에 Bragg cell에 의한 40MHz의 주파수 천이가 있고 스피커의 입력 신호의 주파수 ω_S 도 있는 상태에서의 주파수 변화가 일어나는 경우의 spectrum 분석파형이다.

그림 5에서 보는 바와 같이 스피커가 ω_S 의 주파수로 진동할 경우 photodetector의 출력신호는 주파수 변조(FM)되고 있음을 알 수 있다.

식 (7)에서와 같이 스피커의 표면이 정현적으로 진동한다고 가정하면 표면 속도 $V(t)$ 는 시간의 함수이므로 그림 5와 같은 spectrum이 나타나게 된다.



-그림 4 : $\omega_B = 40\text{MHz}$ 만이 있는 변조 되지 않은 spectrum 분석파형



-그림 5 : $\omega_B = 40\text{MHz}$ 에 ω_S 의 신호가 변조된 상태의 spectrum 분석파형

3. 결론

본 연구에서는 진동을 측정하기 위한 기초 실험을 수행하였다. 실험결과에서 보는 바와 같이 Doppler effect를 이용하여 velocity와 displacement를 측정하기 위해 필요한 Doppler 주파수 천이에 의한변조상태를 Photodetector에서 측정할 수 있었다.

이 변조된 신호를 PLL 복조방식을 통해 속도와 변위를 측정하는 실험이 진행중이다.

이에는 복조방식과 증폭, 그리고 filtering 기술들이 뒤따라야 한다.

— 본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] B.E.A.Saleh "Fundamental of Photonics" (Wiley , 1991)
- [2] L.Ristic "Sensor technology and devices" (A.H , 1994)
- [3] R.S.Sirohi "Optical component, system, measurement technics" (Marcel Decker, 1991)
- [4] K.T.Y,Grattan & B.T.Meggitt "Optical fiber sensor technology" (CHAPMAN & HALL , 1995)
- [5] Brian Culshaw "Optical fiber sensor 1,2 " (A.H , 1989)
- [6] 전기학회지 제 45권 제 4호, (1996.5)
- [7] Julian D. C. Jones "Tenth International Conference on Optical Fibre Sensors " pp404-407(11-13 October 1994)