

광섬유 변위 센서를 이용한 미소 진동의 측정에 관한 연구

박 우 종^o, 이 혁
서울대학교 공과대학 전기공학과

Measurement of the small vibration
using a fiber-optic displacement sensor

WooJong Park, Hyuk Lee
Dept. of Electrical Eng., Seoul National University

Abstract

A single-mode fiber-optic interferometer for measuring small vibrations was constructed. The interferometer is based on the Fabry-Perot configuration that uses a single mode bidirectional fiber coupler as a beam splitter and employs peak detection scheme in the signal processing. The instrument was used to measure the displacement of the translator clamped to a piezo crystal.

1. 서 론

최근 10여년에 걸쳐 광학적 간섭계를 사용하여 온도, 가속도, 기계적 진동, 음파, 자기장 등 여러가지 물리량을 측정하려는 연구가 활발히 진행되어 왔다. [1] 간섭계는 레이저 광원의 가간섭성(coherence)을 기본으로하여 측정하고자하는 대상의 물리적 변화를 광학적 위상변화로써 감지하는 것이다.

간섭계 변위센서는 기계적 진동을 측정하는 것으로서 나노미터 단위이하의 정밀한 변위 측정이 가능하므로 원미경(Atomic force microscope)의 탐지침(cantilever)의 변위측정, 생체막의 진동측정 등에 쓰인다. [4] [5] [8] 광섬유는 잘 휘어지는 성질때문에 임의의 위치에 있는 측정 대상물로의 접근이 용이하며 전기적 절연도가 높고 전자기간섭에 영향을 받지않는다. [3] 광섬유 Fabry-Perot 간섭계를 센서로서 사용하자는 생각은 Cielo에 의해 제안되었다. [10] Fabry-Perot 간섭계는 신호범과 기준범을 같은 광섬유를 통해 보내기 때문에 구조가 훨씬 간단해질 수 있고 외부로부터의 노이즈(noise)에 의해 광섬유에 유기되는 위상 변화가 신호범과 기준범에 똑같이 생기기 때문에 위상차에는 포함되지않아 그만큼 외란에 강하다.

본 논문에서는 변위센서로서 방향성 결합기를 사용하여 광섬

유 Fabry-Perot 간섭계(fiber-optic Fabry-Perot Interferometer, FFPI)를 구성하여 미소 진동의 변위와 진동주파수 및 공진주파수를 측정하였다.

2 본 론

2.1 간섭계의 구성

그림 1은 FFPI를 구성하는 광학기구의 배치도이다. 헬륨-네온 레이저에서 나온 빛은 40x 대물렌즈로 집광되어 단일 모드 방향성 결합기로 들어간다. 방향성 결합기내에서 진행되는 빛은 50:50의 비율로 2개의 빔으로 갈라져 광섬유 끝면 (2)와 (3)으로 나온다. 광섬유 끝면 (2)는 간섭계에서 사용되지 않으므로 에폭시(epoxy)에 담아 두었다. 에폭시는 광섬유의 코어(core)를 구성하는 실리카(silica)와 굴절계수가 비슷하므로 광섬유 끝면 (2)에서 빛은 반사되지않고 확산하게 된다. 광섬유 끝면 (3)으로 진행되는 빛은 공기와의 접촉면에서 일부가 반사되고 나머지는 광섬유를 나온다. 광섬유를 나온 빛은 호일에서 반사되어 이중 적은 양이 광섬유 끝면 (3)으로 다시 들어가게된다. 광섬유와 공기와의 접촉면에서 반사된 빛과 다시 광섬유로 들어온 빛은 함께 광섬유 끝면 (4)로 진행한다. 광섬유 끝면 (4)에서 나오는 간섭패턴은 광증배관으로 감지하게된다. 측정대상으로 사용된 것은 PZT가 부착된 변위확대기구이다. 기구의 끝에는 알루미늄 호일을 달아 반사면으로 하였다. PZT를 함수 발생기에 연결해서 정현적으로 구동시켰다. 변위확대 기구는 PZT의 변위를 일정한 비율로 확장시킨다. 광섬유 끝면 (3)과 반사면이 FFPI의 cavity를 형성한다. 변위확대기구에 마이크로미터를 달아 cavity의 길이를 조절할 수 있게 하였다. 광섬유 끝면 (3)에서 반사면으로 향하는 빛의 약 4%가 광섬유 끝면 (3)에서 반사되는데 PZT의 변조(length

modulation)에 무관하므로 기준빔이 된다. 나머지 96%의 빔은 광섬유에서 나와 확산된다. 이 빔은 반사면에서 반사되어 일부가 다시 광섬유로 들어가기는데 PZT의 변조의 영향을 받므로 신호빔이 된다. 간섭은 기준빔의 양과 신호빔의 양이 거의 같을 때 최대로 일어난다. [5] 신호빔의 양은 cavity의 길이의 영향을 받으므로 마이크로미터로 신호빔의 양을 조절해서 기준빔의 양과 거의 비슷하게 한다.[4]

2.2 기본수식

FFPI의 광섬유 끝면 (3)과 공기(air gap), 그리고 반사면에서의 빔의 반사율 보편 각 빔들은 이웃하는 빔과 δ 만큼 크기의 위상차를 가지게 되므로 반사되는 각 빔의 complex amplitude는

$$C_1 = r_{sa}A^{(i)}, C_2 = t_{sa}t_{as}r_{am}A^{(i)}e^{i\delta}, C_3 = t_{sa}r_{as}r_{am}^2A^{(i)}e^{2i\delta}$$

($A^{(i)}$ 는 입사되는 빔의 electric vector의 amplitude, C_i 는 i 번째로 반사되는 빔의 complex amplitude이다.) 등이 된다. 여기서 r_{ij} 는 i 매질과 j 매질 사이의 반사계수, t_{ij} 는 i 매질과 j 매질 사이의 투과계수이고, s는 광섬유 끝면, a는 공기, m은 반사면을 나타낸다.

실제로 cavity의 크기는 매우 작으며, 광섬유 끝면과 반사면의 평행도도 정밀하지 않으므로 간섭을 일으키는 빔의 갯수는 제한되어 이중 빔의 간섭(two beam interference)으로 근사할 수 있다. 반사되는 빔의 electric vector의 amplitude를 처음 2개의 반사빔만으로 계산하면

$$A^{(r)}(2) = \{r_{sa} + t_{sa}t_{as}r_{am}e^{i\delta}\}A^{(i)}$$

따라서 광감지기(square law photo detector)로 측정되는 반사되는 빔의 강도(intensity)는

$$I^{(r)} = A^{(r)}A^{(r)*} \\ = \{r_{sa}^2 + (t_{sa}t_{as}r_{am})^2 + 2t_{sa}t_{as}r_{am}r_{sa} \cos \delta\}I^{(i)}$$

반사율과 투과율을 대입하여 정리하면

$$r_{sa}^2 = r_{as}^2 = R_s, r_{ma}^2 = r_{am}^2 = R_m, t_{sa}t_{as} = T_s, t_{ma}t_{am} = T_m$$

전달함수(transfer function)는

$$\frac{I^{(r)}}{I^{(i)}} = \{(\sqrt{R_s} - T_s\sqrt{R_m})^2 + 4T_s\sqrt{R_mR_s} \sin^2 \frac{\delta}{2}\}$$

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0}n_2h \cos \theta_2 \approx \frac{4\pi}{\lambda_0}n_2h$$

굴절각 θ_2 가 아주 작은 빔들만이 반사되어 다시 광섬유로 돌아갈 것이므로 $\cos \theta_2$ 는 1에 근사한다. λ_0 는 진공에서의 빔의 파장이다. 위상 δ 는 cavity의 길이 h 에 비례하므로 δ 로부터 h 를 알아낼 수 있다.[2]

2.3 실험 결과 분석

2.3.1 변위

FFPI의 전달함수는 정현함수(sinusoidal function)로 2π 의 주기를 갖는다. 위상 δ 가 2π 의 정수배가 되는 h 를 구하면

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0}n_2h$$

$$2\pi m = \frac{4\pi}{\lambda_0}h$$

$$h = \frac{\lambda_0}{2}m$$

(여기에서 공기의 굴절계수 $n_a = 1$ 이고 m 은 정수이다.)

따라서 h 가 $\frac{\lambda_0}{2}$ 만큼 변할 때마다 간섭무늬가 하나씩 생기게 되므로 진동의 변위는 간섭무늬의 극치(peak)의 갯수를 세어서 구할 수 있다.

2.3.2 진동 주파수

간섭무늬 반복형태는 PZT의 진동형태와 일치한다. 따라서 진동의 주기는 간섭무늬의 반복주기로부터 쉽게 알 수 있다. 그런데 일정한 구동 전압에서 PZT의 구동 주파수를 점차 증가시키면 수백 Hz 이상에서는 변위가 감소한다. 이것은 PZT와 변위 확대기구가 기계적인 시스템이므로 고주파에서 제대로 구동되지 못한다는 것을 의미한다. PZT가 공진을 하면 변위가 갑자기 크게 증가한다. 구동 주파수를 변화 시켜가면서 변위를 관찰하면 공진이 일어나는 주파수를 찾아낼 수 있다. 실험에서는 220 Hz 근처에서 공진이 일어나는 것을 확인하였다.

2.3.3 노이즈

간섭계 변위센서에서 나타나는 노이즈는 공기의 흐름(air current), 온도의 변화, 광섬유와 광섬유 결합기(fiber coupler)의 기계적인 진동, 광증배관의 shot noise [3] 등이 있다. 기계적인 진동을 막기 위해서 광학 테이블(optical

table) 위에서 실험을 실시하였고 광증배관의 shot noise를 줄이기 위해 광증배관의 감도를 필요이상으로 크게 하지 않았다.

노이즈에 의해 받는 영향은 초기위상의 변화나 전체적인 빛의 강도의 변동이다. 그러나 본 실험에서는 간섭무늬의 극치만 구분 가능하면 되므로 그다지 심각한 영향을 받지 않았다. 마이크로미터로 cavity의 길이를 조절해 간섭을 최대로하여 유효한 신호를 구분할 수 있도록 하였다.

3 결론

방향성 결합기를 사용하여 광섬유 Fabry-Perot 간섭계를 구성하여 변위센서를 제작하였다. 피에조 크리스탈(piezo crystal)을 정현적으로 진동시켜 진동의 변위, 진동주파수 및 공진주파수를 측정하였다. 변위는 간섭패턴의 극치의 갯수를 세어 레이저 파장의 반파장 단위로 정확하게 측정할 수 있으며 주파수는 간섭패턴의 반복주기로부터 바로 알 수 있다.

4 참고 문헌

[1] T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh and T. Teruzi, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, No. 10, pp. 1624-1632, Oct. 1982.

[2] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 6th edition, Pergamon Press, Oxford, 1980.

[3] B. Culshaw and J. Dakin, *Optical fiber sensors*, Artech House, 1989.

[4] D. Rugar, H.J. Mamin, R. Erlandsson, J.E. Stern and B.D. Terris, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 59, no. 11, pp. 2337-2340, Nov. 1988

[5] S. Breen, B.E. Paton, B.L. Blackford and M.H. Jericho, *Appl. Opt.*, vol. 29, No. 1, pp. 16-18, Jan. 1990.

[6] D.A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge and A.B. Tveten, *Appl. Opt.*, Vol. 19, No. 17, pp. 2926-2929, Sep. 1980.

[7] D.A. Jackson, A. Dandridge and S.K. Sheem, *Opt. Lett.*, Vol. 5, No. 4, pp. 139-141, Apr. 1980.

[8] A.D. Drake and D.C. Leiner, *Rev. Sci.*

Instrum., vol. 55, no. 2, pp. 162-165, Feb. 1984.

[9] S.J. Petuchowski, T.G. Giallorenzi and S.K. Sheem, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, No. 11, pp. 2168-2170, Nov. 1981.

[10] P.G. Cielo, *Appl. Opt.*, Vol. 18, No. 18, pp. 2933-2937, 1979.

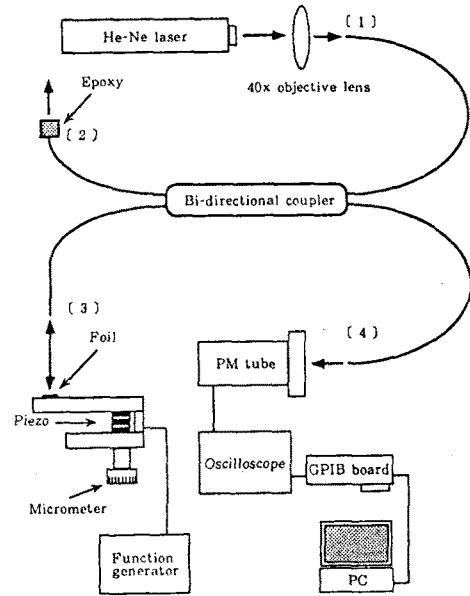


그림 1. 광섬유 Fabry-Perot 간섭계의 실험기구 배치도

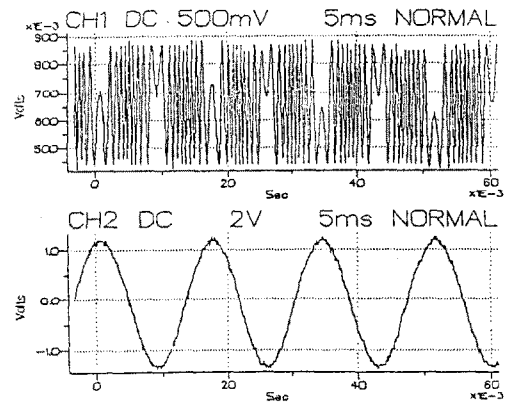


그림 2. 위트그림 : 간섭계의 출력 (한 주기 동안의 간섭무늬의 갯수 = 9개, PZT의 변위 = 711.9 nm)

아랫그림 : PZT의 입력 전압파형 (PZT의 구동전압 = 1.32 volt, 구동주파수 = 59 Hz)