

원통형 압전신장기를 이용한 광섬유 음향센서의 신호안정화

Signal Stabilization of Optical Fiber Acoustic Sensor Using a Cylindrical Piezoelectric Stretcher

이 두 희*, 조 문 재*, 서 상 준*, 은 희 준*

(D. H. Lee, M. J. Jho, S. J. Suh, H. J. Eun)

요 약

단일모드 광섬유를 이용하여 동모나인 검출방식으로 동작하는 Mach-Zehnder 광섬유 간섭계를 구성하여 공기중 음압반응을 조사하였다. 광섬유 간섭계 센서기 직각조건에서 동작하도록 하기 위해 기존 광섬유에 원통형 압전신장기를 사용하는 신호안정화 장치를 제작하였다. 이는 온도변화나 주위환경의 영향에 관계없이 광섬유 간섭계 센서의 감도를 최대의 크기로 일정하게 유지시켜 준다.

ABSTRACT

A Mach-Zehnder interferometer using single mode optical fiber was constructed which operates in homodyne detection scheme. Its response to air-borne sound pressure was examined experimentally. A signal stabilizer was developed for maintaining optical fiber interferometer in quadrature condition using a cylindrical piezoelectric stretcher. This maintains the optical fiber sensor at a maximum sensitivity in the presence of the phase drift caused by temperature fluctuation and other types of environmental disturbances.

I. 서 론

광통신 분야에만 주로 이용되어 오던 광섬유를 음파측정에 이용한 연구결과가 1977년 Bucaro와 Dardy^{(1), (2)}에 의하여 처음으로 발표된 이래 음향, 온

도, 자장, 가속도, 변형, 회전율^{(3), (4)} 등 각종 물리량 측정을 위한 검출소자로 광섬유를 이용하려는 시도가 활발히 이루어져 왔다.

광섬유 센서는 광섬유 자체가 절연체이기 때문에 전자기파에 의한 영향이 배제될 뿐만 아니라 굽힘성이 좋아 센서의 모양을 임의의 형태로 만들 수 있으며 기존센서에 비하여 측정감도가 우수하다는 점등 여러가지의 장점이 있다^{(3), (4)}. 광섬유 센서는 그 종류가 다양하지만 크게 광위상 변조형 (간섭계

* 한국표준연구소 유향연구실

광파의 광세기 변조형으로 구분되는데, 측정감도가 우수한 간섭계형 광섬유 센서의 연구 개발에 주로 중심이 모아져 왔다.

간섭계형 광섬유 센서에서 광섬유 내로 전파되는 광파의 위상은 주위의 온도 변화나 진동, 공기 유동 등제 의하여 상당히 큰 값으로 불규칙하게 변화되기 때문에 감출되는 신호의 크기가 시간의 경과에 따라 변하는 문제가 있다. 따라서 실제 센서로 활용하기 위해서, 외부 환경의 영향에 관계없이 광섬유 간섭계의 측정값도를 일정하게 유지시켜야 한다. 외부 물리량에 의하여 신호광에 유기된 위상변화를 검출하는 방법에는 여러가지가 있지만 일반적으로, 헤테로다인(heterodyne) 방식과 호모다인(homodyne) 방식으로 대별된다. 헤테로다인 방식은 신호소멸 문제를 쉽게 해결해 주는 반면, 주파수 현이들 위해 부피가 크고 전력을 많이 소모하는 Bragg cell을 필요로 한다. 또한 외부 환경요인에 의하여 불규칙하게 변화되는 비정상 잡음신호의 주파수 내역이 신호 주파수 내역과 비슷할 경우 이들을 분리해 내기가 어려우며 호모다인 방식에 비하여 측정감도가 떨어진다.

본 연구에서는 헤테로다인 방식에 비해 훨씬 미소한 위상변화까지 측정할 수 있는 호모다인 방식⁶⁾으로 동작하는 Mach-Zehnder 광섬유 간섭계를 구성하였으며, 주위 환경의 영향에 관계없이 광섬유 간섭계의 신호광과 기준광 사이의 위상차를 항상 $\pi/2$ rad으로 유지시키기 위하여 기준 광섬유에 원통형 압전신장기를 사용하는 능동위상추적(active phase tracking) 방식의 신호안정화 장치를 제작하여 광섬유 센서의 감도가 장시간에 걸쳐 일정하게 유지되는 것을 확인하고, 광섬유 센서의 공기중 음압반응을 조사하였다.

II. Mach-Zehnder 광섬유 간섭계

광섬유 간섭계 음향센서는 일반적으로 그림 1에 보이는 것처럼 Mach-Zehnder 형으로 구성된다. 가간섭성 광원인 레이저 광은 빔분파기(beam splitter)에 의하여 둘로 갈라진 후 하나는 기준 광섬유로, 다른 하나는 센싱 광섬유로 보내진다.

센싱 광섬유가 음장에 노출되면 센싱 광섬유의 코어(core)는 미소한 길이변화와 굴절률 변화를 겪게되어 광섬유를 통하여 지나는 광파의 위상이 변한다. 즉 각주파수가 Ω , 진폭이 P 인 음장에 센싱 광섬유가 놓여질 때 센싱 광섬유를 지나는 광파의 위상은 음장에 의하여 다음과 같이 변조된다⁵⁾.

$$\phi(t) = \left[\frac{dn}{dp} + \frac{n}{\ell} \frac{d\ell}{dp} \right] k\ell p \sin \Omega t \quad (1)$$

여기서 ℓ 은 음장에 노출된 센싱 광섬유의 길이, k는 자유공간에서의 광파의 전파상수, n은 선파모드에 대한 유효굴절률을 나타낸다.

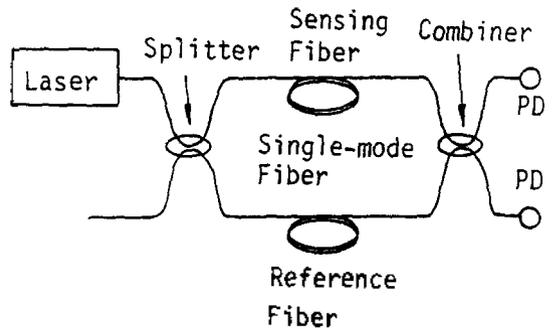


그림 1 Mach-Zehnder fiber optic interferometer.

그림 1의 광섬유 간섭계가 기준 광섬유와 센싱 광섬유를 통하여 지나는 광파의 주파수가 동일한 호모다인 방식으로 동작한다면 광결합기 전단에서 센싱 광섬유를 거쳐나온 신호광의 전기장(electric field)은

$$\vec{E}_s = \vec{E}_s^0 \exp_i [\omega t + \phi(t) + \phi_s] \quad (2)$$

으로 쓸 수 있고, 기준 광섬유를 거쳐나오는 기준 광의 전기장은

$$\vec{E}_r = \vec{E}_r^0 \exp_i [\omega t + \phi_r] \quad (3)$$

로 주어진다. 여기서 ω 는 광파의 각주파수, ϕ_s 와 ϕ_r 는 각각 신호광과 기준광의 임의의 위상요소로서, 광섬유 간섭계가 놓여져 있는 주위환경의 영향

즉 온도변화나 진동등에 의하여 불규칙하게 변화될 수 있는 값들이다.

이들 두광파는 광결합기에 의하여 합성되어 간섭 무늬를 이루게 되는데 이를 광검출기로 검출하면 서로 180°의 위상차를 갖는 두 출력신호를 얻을 수 있다^{(7),(8),(9)}.

$$V_1 = V_0 [1 + \alpha \cos \{ \phi(t) + \phi_s - \phi_r \}]$$

$$V_2 = V_0 [1 - \alpha \cos \{ \phi(t) + \phi_s - \phi_r \}] \quad (4)$$

여기서 V_0 는 입력되는 광파위에 비례하는 상수이고, 결합상수 α 는 광결합기의 분파비(splitting ratio)와 편광상태에 의해 정해진다.

일반적으로 음장에 의하여 신호광에 유기된 위상 변화 $\phi(t)$ 는 그 값이 대단히 작다. 즉 $\phi(t) \ll \pi$ 이다. 따라서 (4)식의 여현항은 $\phi_s - \phi_r$ 에 따라 그 크기가 크게 좌우된다. 이를 그림2에 보이고 있는데 $\phi_s - \phi_r = \pi/2 \pm 2m\pi$ ($m =$ 정수)의 조건이 만족될 때 신호의 크기가 최대로 되며 지그재깅(distortion)이 없어진다. 이 조건을 직각조건(quadrature condition)이라 한다. $\phi_s - \phi_r$ 이 직각조건에서 벗어날수록 신호의 크기는 감소하고 신호파형이 지그재깅기 때문에 호모다인 방식의 광섬유 간섭계에서는 항상 두 광파 사이의 위상차를 직각 조건으로 유지시켜야 한다.

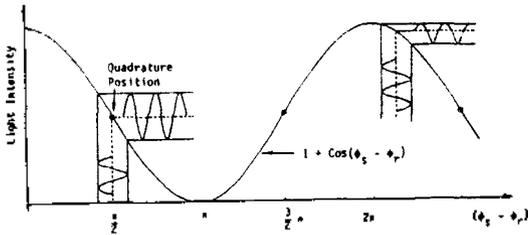


그림2 Light intensity variation vs. optical phase.

III. 신호안정화 이론

그림3에서 보는 것처럼 기준 광섬유에 위상변조

기를 사용하여 광섬유 간섭계가 직각 조건에서 동작하도록 할 수 있다^{(6),(7),(8)}. 위상변조기는 흔히 진동형 압전소자에 광섬유를 삽입시 제작하는데, 압전소자에 전압을 인가하면 압전소자의 직경이 변화되고 이에 따라 압전소자에 감겨진 광섬유의 길이도 변하는 현상을 이용한다.

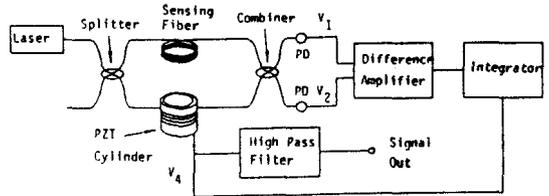


그림3 Block diagram of the feedback stabilization circuit.

신호안정화를 위한 피드백 회로에 연결되어 있는 위상변조기에서 발생하는 위상요소를 $A(t)$ 로 나타내면 (4)식으로 부터

$$V_3 = V_1 - V_2$$

$$= 2 V_0 \alpha \cos \{ \phi(t) + \phi_s - \phi_r - A(t) \} \quad (5)$$

을 얻는다. 여기서 직각조건은 $\phi_s - \phi_r - A = \pi/2 \pm 2m\pi$ 이다. $\phi(t) \ll \pi$ 라고 가정한다면 직각조건 근방에서 (5)식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$V_3 = 2 V_0 \alpha \left\{ \phi(t) + \phi_s - \phi_r - A - \frac{\pi}{2} \right\}$$

$$= 2 V_0 \alpha (\epsilon - A) \quad (6)$$

직각조건에서 V_3 는 거의 0이 되기 때문에 선형 제어 이론(linear control theory)의 관점에서 보면 (6)식은 이상적인 오차신호(error signal)가 된다.

만약 V_3 로 부터 적절한 피드백 전압을 만들어 압전소자에 인가함으로써 ϵ 이 완전히 상쇄되도록 위상항 A 를 만들어 낸다면 오차신호 V_3 가 0이 되도록 할 수 있다. 이러한 피드백 신호는 V_3 의 적분으로 주어진다⁽⁴⁾.

$$V_c = \mu \int_0^r V_0 \cdot r' \cdot dr' \quad (7)$$

V_c 의 대칭 비분할장치는

$$V_c = 2gV_0 \alpha K V_0 = 2gV_0 \alpha \epsilon \quad (8)$$

이때, 피크의 K 는 인가전압 대 위상변화의 비로 주어지는 위상변조기의 변화율이다. 이드백 회로의 대역폭과 대역폭의 곱(gain bandwidth product)이 $2gV_0 \alpha K$ 보다 ϕ 가 훨씬 작다면 식(8)은 $A = V_c / K = \epsilon$ 가 된다. 이때

$$V_c / K = \epsilon = \phi_c - \phi_s = \phi_c - \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

이므로 출력신호 V_c 는 $\phi_c(t)$ 의 선형관계를 갖게 되어 적절한 여과기를 사용함으로써 $\phi_c(t)$ 를 ϕ_s 로 분리 분리할 수 있다.

IV. 실험 및 결과

호모나일 방식으로 동작하는 Mach-Zehnder 형 광검출기 검출계를 그림3과 같이 구성하였다. 광원으로서는 파장이 632.8nm인 He-Ne laser(Spectra Physics 124B, 15mW)를 사용되고 직경이 $4\mu m$ 단일모드 광섬유(NRC F-SV)의 코어에 레이저 광추출을 실어주기 위하여 NA=0.1이고 배율이 10배인 현미경 대물렌즈를 이용하였다.

위상변조기는 인가전압 대 직경변화율이 가장 큰 것으로 알려져 있는 PZT 5H 세라믹으로 만들어진 Vernitron사의 원통형 PZT(Vernitron part No. 16-24125; Length=1.0", Out Diameter=1.5", and Wall thickness=0.125")에 길이 4m의 단일모드 광섬유를 감아서 제작하였다(그림4). 이의 인가전압 대 위상변화 특성은 신호안정화를 위한 피드백 회로를 분리한 상태에서 PZT에 삼각파 또는 정현파를 인가하고 광검출기로 부터의 출력신호를 측정함으로써 결정할 수 있다^{(7),(8),(9)}. 그림5는 그림4에 보이는 위상변조기의 인가전압 대 위상변화 특성을 보인 것인데, 간섭계에서 간섭두께 하나의 이동은 $2\pi rad$ 의 위상변화를 나타내므로 변환율 K 는 약 $1.07\pi rad/V$ 임을 알 수 있다.

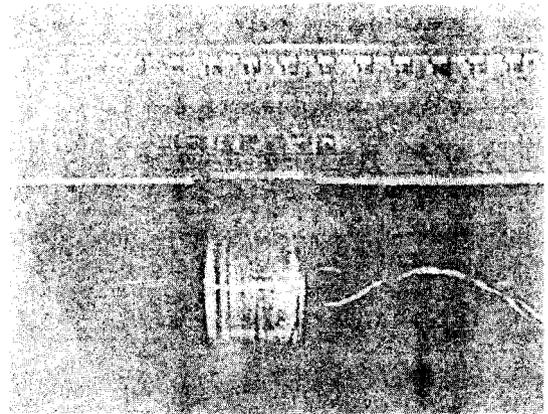


그림 4 Optical phase shifter using PZT cylinder.

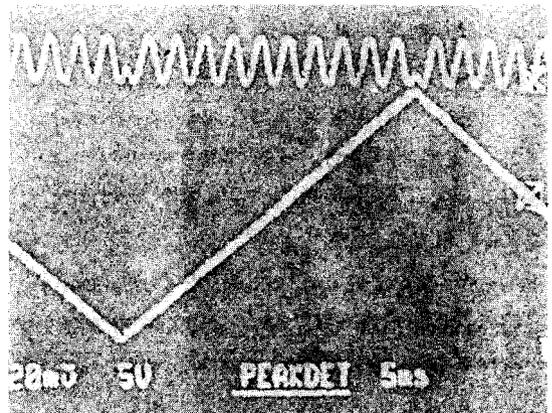


그림 5 Applied ramp signal and interfered fringe signal.

그림6은 신호안정화를 위한 피드백 회로가 동작하지 않는 경우, 센싱 광검출기에 일정한 크기의 음파(high frequency)와 온도변화(low frequency)가 동시에 가하여진 때의 신호파형을 보여주는데 온도가 변화함에 따라 음향신호의 크기가 변하는 것을 알 수 있다.

한편 그림7은 신호안정화를 위한 피드백 회로를 동작시키고 1kHz의 순음을 센싱 광검출기에 가하였을 때 광검출기 센서로 측정된 신호(upper trace)와 콘덴서 마이크로폰(B & K 4165)으로 측정된 신호(lower trace)를 함께 보인 것인데 광검출기 센서로 부터의 신호가 안정화 된 것을 볼 수 있다.

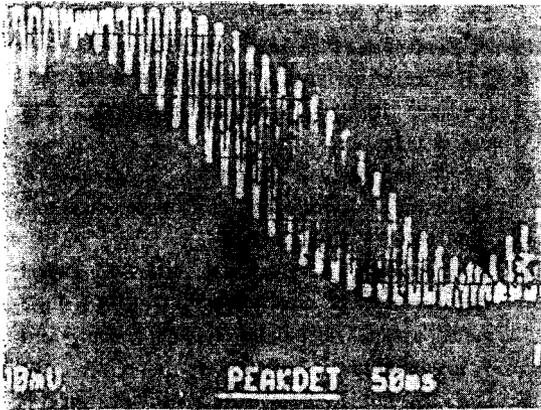


그림 6 Output signal without feedback circuit.

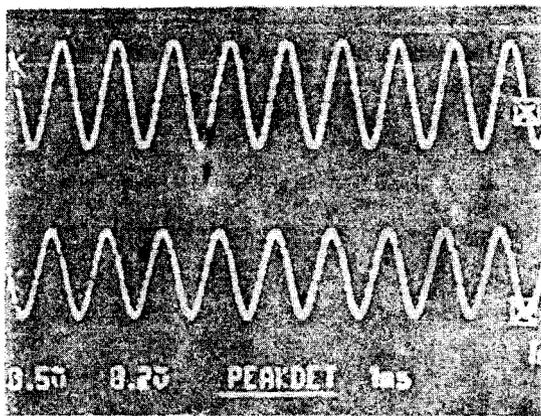


그림 7 Output signal with feedback circuit.

그림 8은 센싱 광섬유에 1 KHz의 일정한 음압이 가해질 때 광섬유 간섭계로부터 나오는 출력신호의 크기를 시간의 경과에 따라 그린 것인데, 광섬유 센서의 감도가 장시간 동안 ± 1 dB 이내로 균일하게 유지되는 것을 알 수 있다. 음장에 노출된 센싱 광섬유의 길이를 약 4 m로 하였을 때, 1 kHz의 음에 대해 음압변화에 따른 광섬유 센서의 출력특성을 그림 9에 나타내었다. 여기서 음압의 크기는 B & K 4165 콘덴서 마이크론으로 측정하였으며, 기준 광섬유(신호안정화 장치에 연결되어 있는 위상변조기)는 외부음장에 의하여 영향을 받지 않도록 하기 위해 벽 내부에 흡음재가 부착된 이중 아크릴 상자속에 설치하였다. 비록 음압의 범위는 34dB에서 92dB로 상당히 제한되어 있지만 광

섬유 변이가 필요한 선형성을 갖는 것을 볼 수 있다. 이 결과로 (보통의 선형)에서는 광섬유 음향계로 음향측정에 활용될 수 있음을 알 수 있다.

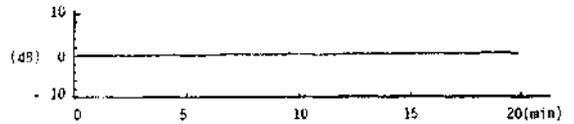


그림 8 Long term stability of optical fiber acoustic sensor.

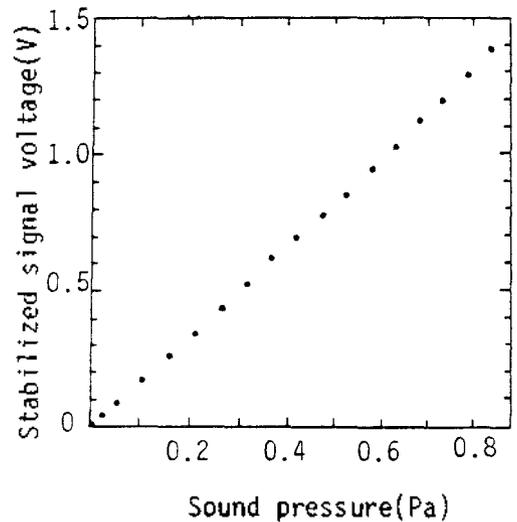


그림 9 Linearity of optical fiber acoustic sensor.

V. 결 론

단일모드 광섬유를 이용하여 기준 광섬유와 센싱 광섬유를 통하여 지나가는 광파의 수파수가 동일한 호모다인 방식으로 동작하는 Mach-Zehnder 광섬유 간섭계를 구성하여 공기중 음압반응을 조사한 결과 광섬유를 음향측정에 활용할 수 있음을 확인하였다. 원통형 압전 신장기에 길이 4 m의 단일모드 광섬유를 감아서 변환율 1.07π rad/V의 위상 변조기를 제작하고 이를 광섬유 간섭계의 reference arm으로 사용하여 능동위상추적(active phase tracking) 방식

으로 광섬유 간섭계의 신호안정화를 이룰 수 있었다.

센서광섬유의 길이분 4m로 하여 광섬유 간섭계 센서의 공기중 음압반응을 측정한 결과 34dB (0.001 Pa)에서 92dB (0.81Pa) 사이의 음압범위에서 양호한 선형성을 볼 수 있었으며, 장기간에 걸쳐 광섬유 간섭계 센서의 측정감도가 1 dB 이내로 한 일하게 유지되는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 광섬유 센서의 주파수 특성과 측정감도 및 측정가능한 최저음압의 한계에 대한 연구가 앞으로 진행될 것이다.

참 고 문 헌

1. J.A. Bucaro, H.D. Dardy, and E.F. Carome, "Optical fiber acoustic sensor.", *Appl. Opt.* 16, 1761 (1977).
2. J.A. Bucaro, H.D. Dardy, and E.F. Carome, "Fiber optic hydrophone", *J. Acoust. Soc. Am.* 62, 1302 (1977).
3. J.A. Bucaro et al., *Physical Acoustic*, Vol.XVI, Academic press Inc., 385-457 (1982).
4. T.G. Giallorenzi et al., "Optical fiber sensor technology", *IEEE J. Quantum Electron.* QE-18, 626 (1982).
5. J.A. Bucaro and T.R. Hickmann, "Measurement of sensitivity of optical fiber for acoustic detection", *Appl. Opt.* 18, 938 (1979).
6. D.A. Jackson, A. Dandridge, and S.K. Sheem, "Measurement of small phase shifts using a single-mode optical fiber interferometer", *Opt. Lett.* 5, 139 (1980).
7. D.A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge, and A.B. Tveten, "Elimination of drift in single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber", *Appl. Opt.* 19, 2926 (1980).
8. K. Fritsch and G. Adamovsky, "Simple circuit for feedback stabilization of a single-mode optical fiber interferometer", *Rev. Sci. Instrum.* 52, 966 (1981).
9. 은희준, 서상준, 이두희, 조분재, 정밀측정 자동화 기술개발에 관한 연구 - 광섬유를 이용한 측정기술 개발, 한국표준연구소, KSRI-87-25-IR. (1987).

▲이 두 희



1957년 2월 1일생
 1980년 2월 고려대학교 물리학과 졸업
 1982년 2월 한국과학기술원 물리학과 졸업
 현재 한국표준연구소 음향연구실 선임연구원

▲서 상 준



1952년 5월 8일생
 1975년 2월 서강대학교 물리학과 졸업
 1977년 2월 한국과학기술원 물리학과 졸업
 현재 한국표준연구소 음향연구실 실장

▲조 분 재



1957년 1월 1일생
 1979년 2월 아주공과대학 전자공학과 졸업
 1981년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업
 현재 한국표준연구소 음향연구실 선임연구원

▲은 희 준



1942년 5월 27일생
 1968년 2월 서울대학교 물리학과 졸업
 1974년 6월 Polytech Institute of New York 전기물리학 Ph. D.
 1974년 6월~1978년 12월 Polytech Institute of New York 연구원
 현재 한국표준연구소 표준2부장