

PZT 위상변조기를 이용한 광섬유 음향센서의 신호안정화

서상준, 이두희, 조문재, 은희준
한국표준연구소

초 록

Homodyne 방식으로 동작하는 광섬유 간섭계 센서는 주위 온도의 변화나 진동등에 의하여 신호의 크기가 불규칙하게 변화된다. 따라서 광섬유 간섭계가 직각조건에서 동작하도록 하여 감도를 최대로 유지시켜야 한다. 본 연구에서는 원통형 압전소자에 단일모드 광섬유를 감아서 변환율 $K=1.07\pi/V$ 의 위상변조기를 만들고, 이를 이용하여 능동 위상추적(active phase tracking)방식의 신호안정화 장치를 제작하여 광섬유 간섭계 센서의 공기중 음압반응을 조사하였다.

I. 서론

광섬유 음향센서는 기존의 센서에 비해 측정감도가 우수하고, 광섬유 자체가 절연체이기 때문에 전자기파에 의하여 영향을 받지 않으며, 굽힘성이 좋아 센서의 형태를 임의로 만들 수 있다는 점등 여러가지의 장점을 갖고 있어 1977년 Bucaro와 Dardy에 의하여 광섬유 음향센서에 관한 연구결과가 처음으로 발표된 이래 이에 대한 관심이 고조되어 왔다[1,2]. 광섬유 간섭계 음향센서는 광섬유가 음장에 노출되면 광섬유에 가해지는 음압에 따라 광섬유내로 전파되는 광파의 위상이 변화되는 현상을 이용하는데, 광섬유내로 전파되는 광파의 위상은 주위의 온도변화나 진동등에 의하여 상당히 큰 값으로 불규칙하게 변화되기 때문에 검출되는 신호의 크기가 시간에 따라 변화된다는 문제점이 있다. 실제 센서로 활용하기 위해서는 광섬유 간섭계가 항상 직각조건(quadrature condition)에서 동작하도록 하여 측정감도를 최대의 크기로 일정하게 유지시켜 주어야만 한다.

본 연구에서는 원통형 압전소자에 단일모드 광섬유를 감아서 만든 위상변조기를 사용하여 광섬유 간섭계가 직각조건에서 동작하게 하는 신호안정화 장치를 제작하고, 이를 이용하여 공기중에서 광섬유 간섭계 센서의 음압반응을 조사하였다.

II. 동작 원리

광섬유 간섭계 음향센서는 일반적으로 Fig. 1에 보이는 것처럼 Mach-Zehnder형으로 구성된다. 레이저 광은 광분파기(beam splitter)에 의하여 둘로 갈라진후 하나는 음장에 직접 노출되는 센서 광섬유로 보내지고 다른 하나는 외부 음장으로부터 영향을 받지 않는 기준 광섬유로 보내진다.

광섬유 간섭계의 신호광에 유기된 위상변화를 검출하는 방법으로는 여러가지가 있다[3-5]. 여기서는 heterodyne 방식[4]에 비하여 훨씬 미소한 위상 변화까지 측정할 수 있는 homodyne 방식에 대해서 살펴보기로 한다.

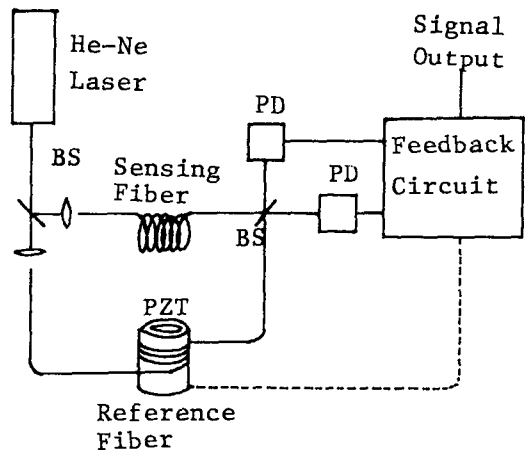


Fig. 1. Mach-Zehnder fiber optic interferometer.

센서 광섬유가 음장에 노출되면 레이저 광속이 전파되는 센서 광섬유의 코어는 미소한 길이 변화와 굴절을 변화를 겪게 되어 광섬유를 통하여 지나는 광파의 위상은 센서 광섬유에 가해지는 음압에 따라 변한다. 광결합기를 통하여 나오는 두 광파를 광검출기로 검출할 때 두 광검출기의 위치를 적절히 조절함으로써 서로 180°의 위상차를 갖는 두 전기신호 V_1 과 V_2 를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} V_1 &= V_0 [1 + \alpha \cos(S(t) + \phi_s - \phi_r)] \\ V_2 &= V_0 [1 - \alpha \cos(S(t) + \phi_s - \phi_r)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 V_0 는 입력되는 광파위에 비례하는 상수이고, 결합상수 α 는 광결합기의 분파비 (splitting ratio)와 편광상태에 의하여 정하여 진다. 센서 광섬유에 가하여지는 음압에 비례하여 발생하는 $S(t)$ 는 일반적으로 대단히 작다. 즉 $S(t) \ll \pi$ 이다. ϕ_s 와 ϕ_r 는 각각 센서 광섬유와 기준 광섬유를 지나는 광파의 임의의 위상요소이다. 식 (1)의 두 신호 V_1 과 V_2 의 차를 취함으로써 직류성분은 제거된다.

$$\begin{aligned} V_3 &= V_1 - V_2 \\ &= 2V_0 \alpha \cos(S(t) + \phi_s - \phi_r) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 직각조건은 $\phi_s - \phi_r = \pi/2 \pm 2m\pi$ (m 은 정수)이다. 이러한 직각조건 아래서는 차신호 V_3 는 $S(t)$ 에 비례한다. 그러나 실제의 광섬유 간섭계는 주변 환경의 영향으로 인하여 ϕ_s 와 ϕ_r 이 상당히 큰 값으로 불규칙하게 변화되기 때문에 직각조건이 잘 만족되지 않는다.

간섭계를 직각조건으로 유지시키기 위하여 Fig. 1에 보이는 것과 같이 원통형의 압전소자에 광섬유를 감아서 만든 위상변조기를 사용한다. 피드백 회로에 연결되어 있는 위상변조기에서 발생하는 위상요소를 $A(t)$ 로 나타내면 차신호 V_3 는

$$V_3 = 2V_0 \alpha \cos\{S(t) + \phi_s - \phi_r - A(t)\} \quad (3)$$

로 쓸 수 있고, 여기서 직각조건은 $\phi_s - \phi_r - A = \pi/2 \pm 2m\pi$ 이다. 이때 직각조건 근방에서 $S(t) \ll \pi$ 이므로 다음과 같이 V_3 를 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} V_3 &= 2V_0 \alpha \{S(t) + \phi_s - \phi_r - A - \pi/2\} \\ &= 2V_0 \alpha (\mathcal{E} - A) \end{aligned} \quad (4)$$

직각조건에서 V_3 가 거의 0이 되기 때문에 선형조절이론의 관점에서 보면 식 (4)는 이상적인 오차신호(error signal)가 된다. 만약 V_3 로 부터 적절한 피드백 전압을 만들어 압전소자에 인가함으로써 \mathcal{E} 가 완전히 상쇄되도록 위상항 A 를 만들어 낸다면 오차신호가 0이 되게 할 수 있다. 이러한 피드백 신호는 V_3 의 적분으로 주어진다.

$$V_4 = g \int_0^{\tau} V_3(t') dt' \quad (5)$$

V_4 에 대한 미분방정식은

$$\dot{V}_4 + 2gV_0 \alpha KV_4 = 2gV_0 \alpha \mathcal{E} \quad (6)$$

이며, 여기서 K 는 인가전압대 위상변화의 비로 주어지는 위상변조기의 변환율

(conversion factor)이다. 피드백 회로의 이득과 대역폭의 곱(gain bandwidth product)인 $2gV_4K$ 보다 $S(t)$ 가 훨씬 작다면 식 (6)은 $A (= V_4K) = \epsilon$ 를 보장하게 된다. 이때

$$V_4K = \epsilon = S(t) + \phi_s - \phi_r - \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

이므로 V_4 는 $S(t)$ 와 선형관계를 갖게된다.

III. 실험 및 결과

Homodyne 방식으로 동작하는 Mach-Zehnder형 광섬유 간섭계를 Fig. 1과 같이 구성하였다. 광원으로는 파장이 632.8 nm인 He-Ne laser(Spectra Physics 124B, 15 mW)를 사용하고, 직경이 4 μ m인 단일 모드 광섬유의 코아에 레이저 광속을 실어 주기 위해 NA = 0.1 이고 배율이 10배인 현미경 대물렌즈를 이용하였다.

신호안정화를 위한 피드백 회로의 구성도는 Fig. 2와 같다. 광섬유 간섭계의 두 광검출기는 각각 낮은 출력 임피던스를 갖는 IVC(current-to-voltage converter)에 연결되며 이들 IVC로부터의 출력신호는 차동 증폭기(difference amplifier)에 입력되어 직류성분은 제거되고 신호 성분을 포함하고 있는 V_3 가 출력된다. 차동증폭기에서 나온 차신호 V_3 는 적분기를 거쳐 간섭계의 보정용 위상 변조기로 들어가는 보정신호 V_4 가 만들어 진다. 또한 이 신호는 고역통과 여파기를 거쳐 저주파 성분의 표류신호가 제거된 $S(t)$ 에만 비례하는 신호가 얻어진다.

직경이 1.5"인 원통형 압전소자(Vernitron PZT 5H part no. 16-24125)에 약 4 m의 단일 모드 광섬유를 감아 Fig. 3에 보이는 위상변조기를 제작하였다. 이의 인가전압대 위상변화 특성은 압전소자에 삼각파(또는 정현파)를 인가하고 이때 변화되는 위상을 읽어 측정할 수 있다. Fig. 4는 제작된 위상변조기의 인가전압대 위상변화 특성을 보여주는데 변환율 K 는 $1.07 \pi \text{ rad/V}$ 이다.

Fig. 5는 광섬유 간섭계에 신호안정화를 위한 피드백 회로가 없는 경우의 신호 파형을 보여준다. Fig. 6는 피드백 회로를 사용한 경우, 1 KHz의 순음이 가해질 때, 광섬유 간섭계 센서로 잡은 신호(upper trace)와 콘덴서 마이크로폰(condenser microphone)으로 잡은 신호(lower trace)를 함께 보여준다. 이 그림에서 보면 광섬유 간섭계 센서로부터의 신호가 안정화되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 7은 일정한 음압이 센서 광섬유에 가해질 때 광섬유 간섭계 센서로부터 나오는 신호의 크기를 시간의 경과에 따라 그린 것이다. 이에서 보면 신호의 크기는 $\pm 1 \text{ dB}$ 이내로 균일하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 광섬유 간섭계 센서의 선형성을 보여준다. 여기서 최소점과 최대점의 음압은 각각 34 dB와 92 dB이다.

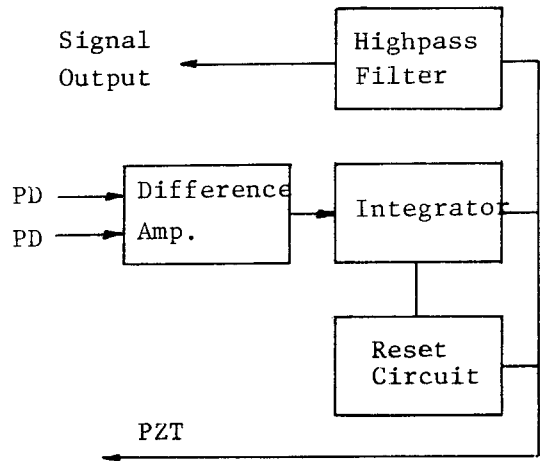


Fig. 2. Block diagram of feedback circuit.



Fig. 3. Optical phase shifter using PZT cylinder.

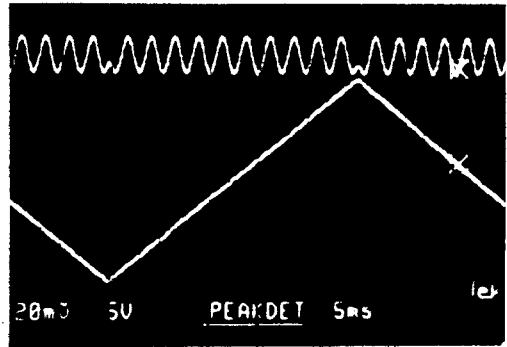


Fig. 4. Applied ramp signal and interfered fringe signal.

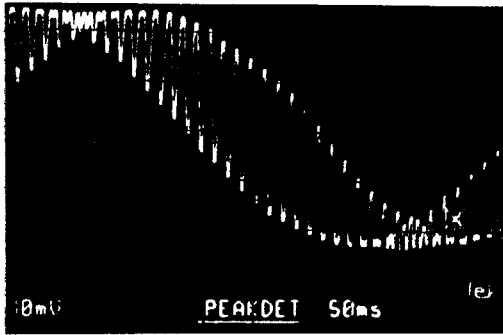


Fig. 5. Output signal without feedback circuit.

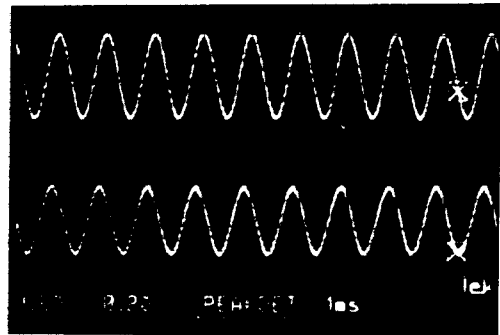


Fig. 6. Output signal with feedback circuit.

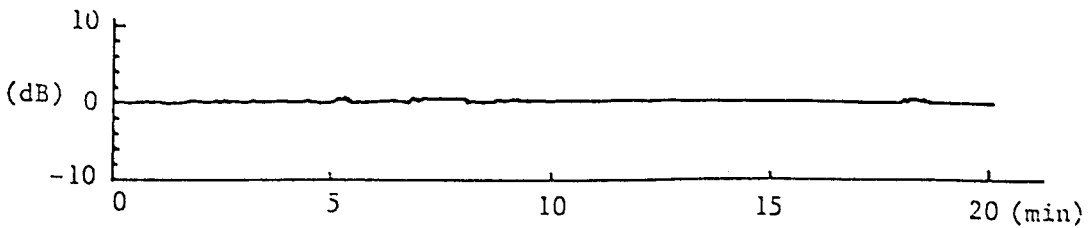


Fig. 7. Long term stability of optical fiber acoustic sensor.

IV. 결론

Homodyne 방식으로 동작하는 광섬유 간섭계는 일반적으로 광섬유 간섭계가 놓여져 있는 주위환경의 영향에 의하여 신호의 크기가 불규칙하게 변화되는 문제가 따른다. 이의 해결을 위하여 원통형 압전소자에 4 m의 광섬유를 감아 변환율 $1.07 \pi \text{rad/V}$ 의 위상변조기를 만들고, 이를 광섬유 간섭계의 reference arm에 사용하여 능동위상추적 방식으로 광섬유 간섭계 센서의 출력 신호가 안정화됨을 확인하였다.

센서 광섬유의 길이를 4 m 정도로 하였을 때 공기중에서 음압변화에 따른 광섬유 간섭계의 출력신호를 측정할 결과 양호한 선형성을 볼 수 있었으며, 실험실 내에 존재하는 높은 압소음 (background noise) 하에서도 34 dB의 음압까지 측정할 수 있었다.

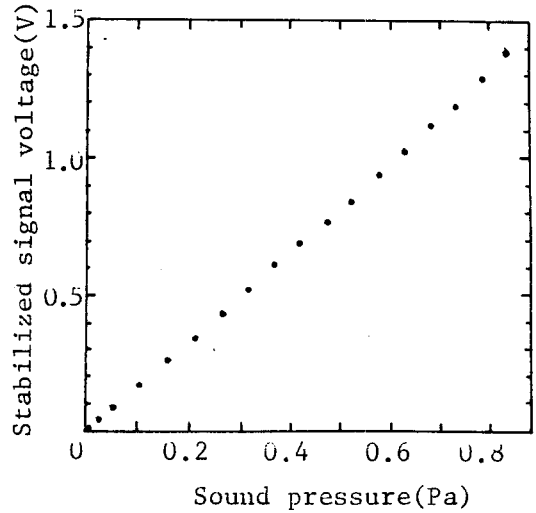


Fig. 8. Linearity of optical fiber acoustic sensor.

참고문헌

1. J. A. Bucaro, H. D. Dardy, and E. F. Carome, Appl. Opt., Vol.16, pp. 1761-1762 (1971).
2. J. H. Cole, R. L. Johnson, and P. G. Bhuta, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 62, pp. 1136 - 1138 (1977).
3. J. A. Bucaro and T. R. Hickman, Appl. Opt., Vol. 18, pp. 938 - 940 (1979).
4. D. A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge, and A.B. Tveten, Appl. Opt. Vol. 19, pp. 2926 - 2929 (1980).
5. J. H. Cole, B. A. Danver, and J.A. Bucaro, IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-18, pp. 694 - 5977 (1982).
6. G. S. Maurer, L. Schuetz, J. H. Cole, and J. A. Bucaro, Opt. Lett., Vol. 7, pp. 503 - 505 (1982).