

이두희, 서상준, 은희준  
한국표준연구원

Development of Single-mode Optical Fiber Acoustic Sensor

Doo Hee Lee, Sang Joon Suh, and Hee Joon Eun  
Korea Standards Research Institute

1. 서론

광섬유를 이용한 측정센서는 1977년 Bucaro 와 Dardy 에 의하여 음향측정 센서가 발표되면서 본격적으로 연구되기 시작하였다.

광섬유 센서는 그 종류가 다양하지만 크게 광외상 변조형과 광세기 변조형으로 구분된다. 광외상 변조형 센서는 측정하고자 하는 물리량에 의하여 위상이 변조된 광파를 기준광과 간섭을 시켜 위상 변화량을 검출함으로써 물리량을 측정하는 방법으로 감도가 좋은 장점이 있다. 한편 광세기 변조형 센서는 외부 물리량이 광섬유 또는 광섬유에 부착된 장치에 작용하여 광섬유내로 전파되는 광세기를 직접 변조시키는 방법으로 그 구조가 단순하고 신호 처리가 간단하다는 장점을 갖는다.

본 연구에서는 주로 음향측정에 관심을 두어 단일 모드 광섬유를 이용하여 homodyne 방식의 Mach-Zehnder 광섬유 간섭계를 구성하여 공기중에서의 음압반응을 조사하였다. 또한 주위환경의 영향으로 인하여 발생하는 신호소멸(signal fading) 문제를 해결하기 위하여 원통형 압전소자에 광섬유를 감아서 만든 위상변조기(phase shifter)를 이용하여 광섬유 간섭계를 직각조건(quadrature condition)에서 동작하도록 하는 신호안정화 장치를 제작하여 간섭계의 감도가 최대로 유지되도록 하였다.<sup>[1]</sup>

2. Mach-Zehnder 광섬유 간섭계 센서

광섬유 간섭계 음향센서는 일반적으로 Fig. 1 에 보이는 것처럼 Mach-Zehnder 형으로 구성된다.

가간섭성 광원인 레이저광은 광분파기(beam splitter)에 의하여 둘로 갈라진 후 하나는 기준 광섬유로 보내지고 다른 하나는 센서 광섬유로 보내진다.<sup>[2]</sup>

센서 광섬유가 음장(sound field)에 노출되면 센서 광섬유의 코아(core)는 미소한 길이변화와 굴절률 변화를 겪기 되어 광섬유를 통하여 지나는 광파의 위상이 변화된다. 즉, 각 주파수가  $\omega$ , 진폭이  $p$  인 음장에 센서 광섬유가 놓여질 때 센서 광섬유를 통과하는 광파의 위상은 음장에 의하여 다음과 같이 변조된다.

$$\phi(t) = \left[ \frac{dn}{dp} + \frac{n}{l} \frac{dl}{dp} \right] klp \sin \omega t \quad (1)$$

여기서  $l$  은 음장에 노출된 센서 광섬유의 길이,  $n$  은 자유공간에서의 광파의 전파상수,  $k$  은 전파모드에 대한 유효굴절률을 나타낸다.

Fig. 1의 광섬유 간섭계가 기준 광섬유와 센서 광섬유를 통하여 지나는 광파의 주파수가 동일할, 호모다인(homodyne) 방식으로 동작한다고 가정할 때 광결합기 전단에서 센서 광섬유를 거쳐 나온 신호광의 전기장은

$$\vec{E}_s = \vec{E}_s^0 \exp i[\omega t + \phi(t) + \phi_0] \quad (2)$$

으로 쓸 수 있고, 기준 광섬유를 거쳐 나오는 기준광의 전기장은

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

로 주어진다. 여기서  $\omega$  는 광파의 각 주파수이고

$\phi_s$  와  $\phi_r$ 은 각각 신호광과 기준광의 임의의 위상 요소로서 주위환경, 즉 온도변화나 진동 등에 의하여 불규칙하게 변화될 수 있는 양이다.

이들 두 광파는 광결합기에 의하여 합성되어 간섭 무늬를 이루게 되는데, 이를 광검출기도 검출하면 광세기에 비례하여 광검출기에 나오는 전기적 신호는 다음과 같다.

$$S(t) = V_0 \left\{ 1 + \alpha \cos(\phi(t) + \phi_s - \phi_r) \right\} \quad (4)$$

여기서  $V_0$ 는 입력되는 광파역에 비례하는 상수이고, 결합상수  $\alpha$ 는 광결합기의 분배비(splitting ratio)와 편광상태에 의하여 정해진다.

일반적으로 음장에 의하여 신호광에 유기된 위상 변화  $\delta$ 는 그 값이 대단히 작다. 즉  $\delta \ll \pi$ 이다. 따라서 식(4)의 여현항은  $\phi_s - \phi_r$ 에 따라 그 크기가 크게 좌우된다. 이를 Fig. 2에 보이고 있는데  $\phi_s - \phi_r = \frac{\pi}{2} \pm 2m\pi$  ( $m =$  정수)의 조건이 만족될 때 신호의 크기가 최대 되며, 페그 비침(distortion)이 없어진다. 이 조건을 직각조건(quadrature condition)이라 한다.  $\phi_s - \phi_r$ 이 직각조건에서 벗어날수록 신호의 크기는 감소하고 신호파형이 찌그러지기 때문에 호모다인 방식의 광섬유 간섭계에서는 항상 두 광파사이의 위상차가 직각조건이 되도록 하여야 한다.<sup>[3]</sup>

### 3. 실험결과 및 논의

호모다인 방식으로 동작하는 Mach-Zehnder형 광섬유 간섭계를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 실험에 사용한 단일모드 광섬유는 NRC F-SV로 이의 물리적 특성은 Table 1에 나타나 있으며, 파장이 632.8 nm 인 He-Ne laser(Spectra Physics 124B, 15 mW)를 광원으로 사용하였다. 레이저 광속을 광섬유의 코어에 실어주기 위해 NA = 0.1 이고 배율이 10배인 현미경 대물렌즈를 이용하였다.

Table 2-1. Physical characteristics of the NRC F-SW single mode fiber.

Parameter	Value
Attenuation	10 dD/km at 632.8 nm
Core diameter	4 $\mu$ m
Cladding diameter	125 $\mu$ m
Jacket diameter	250 $\mu$ m
Numerical aperture	0.1

광섬유 간섭계가 직각조건에서 동작하도록 하기 위하여 직경이 1.5" 인 원통형 압전소자(Vernitron PZT 5H Part No. 16-24125)에 길이 370 cm 의 단일모드 광섬유를 감아 변환율이 0.738  $\pi/V$  인 위상 변조기(phase shifter)를 만들고, 이를 사용하는 능동 위상추적(active phase tracking) 방식의 신호안정화 장치를 제작하였다.

Fig. 3의 센서 광섬유 대신 변환율 0.738  $\pi/V$  인 음향신호 simulator를 놓고 정현파 발생기(B&K Type 1023)를 이에 연결하여  $f = 1$  kHz 에서 0.1  $\pi$ 와 0.2  $\pi$ 의 크기로 위상을 변조시킬 때 광섬유 간섭계로부터 출력되는 신호를 Fig. 4에 보였다. 이에서 보면 0.1  $\pi$ 와 0.2  $\pi$ 의 위상변화에 대해 광섬유 간섭계의 출력신호는 각각 100 mV 와 200 mV로 정확히 비례할 뿐만 아니라 안정화 되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5는 센서 광섬유의 길이를 6 m 로 하여 1 kHz 의 손음에 가해질 때 공기중에서 음압변화에 따른 간섭계의 출력변화를 측정한 결과를 보인 것이다. 음압은 B & K 4165 콘덴서 마이크로폰으로 측정하였으며, 기준광섬유(신호안정화 장치에 연결되어 있는 위상변조기)는 외부음장에 의하여 영향을 받지 않도록 하기 위하여 이중으로 된 아크릴 케이스속에 넣었다. 비록 음압범위가  $3 \times 10^{-4}$  Pa -  $1.64 \times 10^{-2}$  Pa 까지로 상당히 제한되어 있지만 음압과 간섭계의 출력신호 사이에는 양호한 선형관계가 있음을 볼 수 있다. 이때 실험실내에 지주파 성분은 높은 압소음이 존재함에도 불구하고 1 kHz 의 손음에 대해 6 m 의 센서 광섬유로 측정할 수 있는 최저

음압은 약  $3 \times 10^{-4}$  Pa 이었다. 이에 대응되는  
 센서 광섬유를 전파하는 신호광에 일어난 위상변화  
 는 약  $3 \times 10^{-3}$   $\pi$  이다.

4. 참고 문헌

- 1) 광섬유를 이용한 측정기술 기법, 한국표준  
 연구소, KSRI-86-22-IR.
- 2) T.G. Giallorenzi et al., IEEE Journal of  
 Quantum Electronics, Vol. QS-18, No. 4,  
 pp. 626 - 665 (1982).
- 3) D.A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge,  
 and A. B. Tveten, Applied Optics, Vol. 19,  
 pp. 2926 - 2929 (1980).

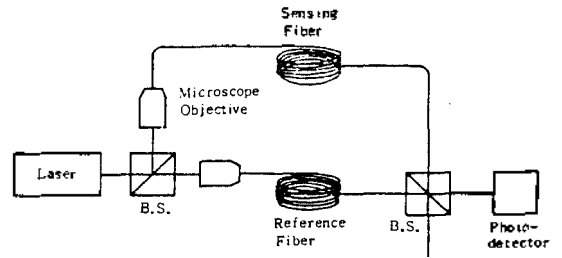


Fig. 1. Basic configuration of Mach-Zehnder fiber optic interferometer.

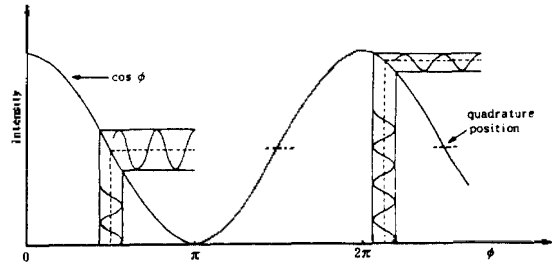


Fig. 2. Light intensity variation vs. optical phase.

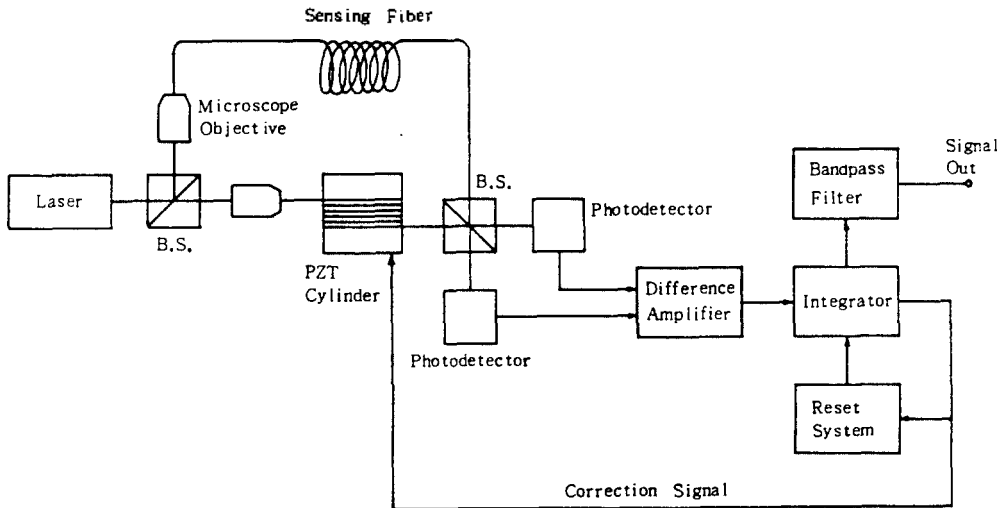
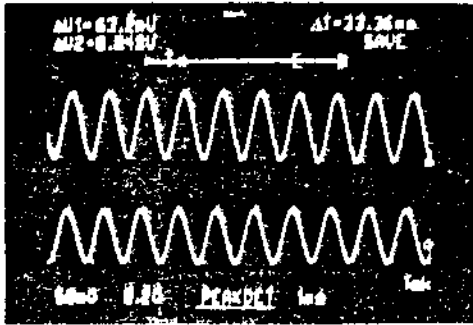
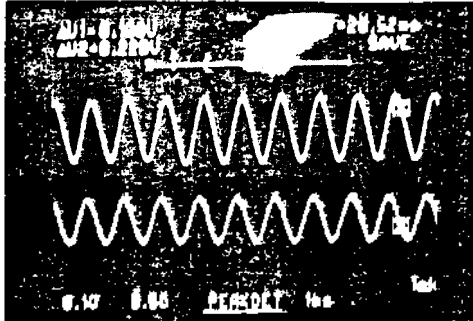


Fig. 3. Mach-Zehnder fiber optic interferometer with the feedback stabilization system.



(a)



(b)

Fig. 4. Oscilloscope trace of feedback stabilized signals (upper traces) and phase modulation signals(lower traces).

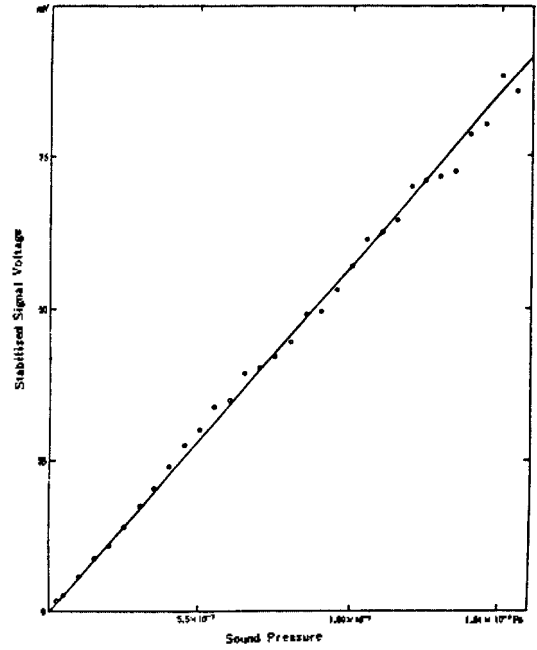


Fig. 5. Variation of the feedback stabilized signal voltage as a function of the sound pressure.