

## 광섬유 압력센서

### Fiber Optic Pressure Sensor

°이 기 원° 배 준 형°

\* 국방과학연구소 ( Tel : 042-821-4595; Fax :042-821-2224 )

**Abstracts** In this paper, a sensitivity of the fiber optic pressure sensor in water is demonstrated. A single mode optical fiber Mach-Zehnder interferometer used to detect the change in optical path length produced by the change of fiber optic strain in water. The sensitivity with this system measured 100  $\mu$ psia through an experiment in the static response.

**Keywords** Fiber Optic Pressure Sensor, Mach-Zehnder interferometer

#### 1. 서론

광섬유에 유기된 음향에 의하여 발생된 위상변조를 이용한 음향계측센서는<sup>[1-5]</sup> 이미 오래전에 보고되었다. 특히, Bucaro와 Hickman<sup>[5]</sup> 등은 100 - 1200 Hz 범위의 음향주파수대에서 광섬유를 통한 헤테로다인 측정을 수행하여 매우 높은 감도를 얻을 수 있었다. 광섬유 압력센서에 대한 연구보고<sup>[6-8]</sup>중 Fields와 Asawa 등은 마이크로 bending에 의한 압력을 계측하는 방법을 이용하여 1 Hz 대역폭에서 미세한 압력을 측정하여 보고한 바 있다.

본 논문은 광위상 변조형 단일모드 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 압력을 측정하기 위한 실험장치의 제작과 이론적 배경을 서술하고 비교용 압력센서와의 수중압력 실험을 통한 광섬유 압력센서의 특성 및 결과를 분석, 고찰하였다.

#### 2. 이론적 배경

광섬유에 인가된 압력(P)에 의하여 등방성 응력( $\sigma$ )이 발생된 단일모드 광섬유는 전단응력 성분은 없으며 3축 성분벡터로 응력을 표시하면 다음과 같다.

$$\sigma = \begin{bmatrix} -P \\ -P \\ -P \end{bmatrix}$$

여기서 응력( $\sigma$ )은 세축 x, y, z 방향에 대한 벡터값 스트레인 ( $\epsilon$ )으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P(1-2\mu)/E \\ -P(1-2\mu)/E \\ -P(1-2\mu)/E \end{bmatrix}$$

여기서  $\epsilon$  = strain  
 $\sigma$  = stress  
E = Young's modulus  
 $\mu$  = poisson's ratio

광섬유 코아(core) 지름을 D, 길이를 L, 코아의 굴절율을 n<sub>i</sub>라고 하면, 빛의 자유공간 전파상수 k<sub>0</sub>가 전파상수  $\beta$ 를 가진 단

일모드 광섬유에 입사될 때 광섬유를 통과하는 광파의 위상( $\phi$ )은  $\phi = \beta L$ 이 된다. 광섬유가 길이방향으로 균일한 압력을 받게 되면 광파의 위상이동  $\Delta\phi$ 는 다음과 같이 표시된다.<sup>[9]</sup>

$$\Delta\phi = \beta\Delta L + L\Delta\beta \quad (1)$$

식 (1)에서 오른쪽 관계식 첫 항은 스트레인에 의하여 발생된 길이의 물리적 변화에 대한 영향을 나타낸다. 응력과의 관계식으로부터  $\beta\Delta L$ 은 다음과 같다.

$$\beta\Delta L = \beta\epsilon_z L = -\beta(1-2\mu)LP/E \quad (2)$$

식 (1)의 둘째 항은  $\beta$ 의 변화에 의한 위상( $\phi$ )의 관계식을 나타낸 것으로 다음과 같이 두가지 영향에 의한 것이다.

첫째는 스트레인에 의한 스트레인·광학 효과가 광섬유의 굴절율을 변화시키는 것이고, 둘째는 스트레인에 의해 발생된 광섬유 지름의 변화에 따른 광도파모드산란영향이다.

식 (1)의  $L\Delta\beta$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$L\Delta\beta = L \frac{d\beta}{dn} \Delta n + L \frac{d\beta}{dD} \Delta D \quad (3)$$

여기서  $\beta = n_{eff}k_0$ 가 된다. 효과굴절율( $n_{eff}$ )은 코아와 크래딩(Cladding) 굴절율 차가 되며, 이 굴절율( $n_{eff}$ )은  $\beta = nk_0$ 로 이용될 수 있는 것과 비교할 때 약 1%의 차를 가지고 있으므로

$$(d\beta)/(dn) = k_0 \quad (4)$$

로 놓을 수 있다.

스트레인·광학 효과는 다음과 같이 표준 침자 약어를 이용하여 광학적 인디카트릭스(indicatrix)의 변화로 나타낸다.

$$\Delta \left( \frac{1}{n^2} \right)_i = \sum_{j=1}^6 D_{ij} \epsilon_j$$

여기서, 전단 스트레인은 없으므로  $\epsilon_4 = \epsilon_5 = \epsilon_6 = 0$  이 된다. 등방성 균일물질<sup>[10]</sup>에 대한 스트레인 광탄성 계수  $D_{ij}$ 를 고찰해보면  $i, j = 1, 2, 3$  성분만을 고려하여 다음과 같이 표시된다.

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{12} \\ D_{12} & D_{11} & D_{12} \\ D_{12} & D_{12} & D_{11} \end{bmatrix}$$

여기서  $D_{ij}$ 는  $j$ 방향으로 인가된 스트레인에 대한  $i$ 방향의 광섬유의 광탄성 계수이다. 그런데 광학적 인디카트릭스의 변화는 다음과 같다.

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{x,y,z} = -\frac{p_{11}P(1-2\mu)}{E} - \frac{2p_{12}P(1-2\mu)}{E} \\ = -(P/E)(1-2\mu)(p_{11}+2p_{12}) \quad (5)$$

$z$ 방향에 대한 빛의 전파는 굴절율의 변화로 볼 수 있으므로

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{x,y} = \\ = \frac{1}{2} n^3 (P/E)((1-2\mu)(2p_{12} + p_{11})) \quad (6)$$

한편 식 (3)에서 마지막 항은 광섬유의 지름 변화에 의한 도파모드 전파상수의 변화를 나타내므로 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta D = \epsilon_x D = -PD((1-2\mu)/E) \quad (7)$$

$db/dD$  항은 도파관모드<sup>[11]</sup>를 표현하는 정규화된 파라메타들을 이용하여 다음과 같이 표시된다.

$$b = \frac{\beta^2/k_0^2 - n_{clad}^2}{n_{core}^2 - n_{clad}^2} \quad (8) \\ V = k_0 D (n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{1/2}$$

따라서

$$\frac{db}{dD} = \frac{db}{db} \cdot \frac{db}{dV} \cdot \frac{dV}{dD} \quad (9)$$

여기서

$$\frac{dV}{dD} = k_0 (n_{core}^2 - n_{clad}^2)^{1/2} = \frac{V}{D} \quad (10)$$

$$\frac{db}{db} = \frac{(n_{core}^2 - n_{clad}^2) k_0^2}{2\beta} = \frac{V^2}{2\beta D^2} \quad (11)$$

또한  $(db/dV)$ 는 도파모드를 표현하는 한 방식에서의  $b-V$  산란곡선의 경사도를 나타낸다.

식 (1)에 이상의 관계식들을 대입하면 다음과 같다.

$$\Delta\Phi = -\beta(1-2\mu)LP/E + k_0 n^3 L(P/E)(1-2\mu)(2p_{12} + p_{11})/2 \\ - \frac{LPD(1-2\mu)}{E} (V/D)(V^2/2\beta D^2) \frac{db}{dV} \quad (12)$$

또한, 단위 광섬유 길이와 압력에 위상변화는 아래와 같다.

$$\frac{\Delta\Phi}{PL} = -\frac{\beta(1-2\mu)}{E} + \frac{\beta n^2}{2E} (1-2\mu)(2p_{12} + p_{11}) \\ - \frac{V^3(1-2\mu)}{2\beta E D^2} \cdot \frac{db}{dV} \quad (13)$$

식 (13)에서 도파관모드 산란효과를 나타내는 셋째 항은 첫째 항과 둘째 항에 비교하여 무시될 수 있는 항이므로  $(\Delta\Phi/PL)$ 는 다음과 같이 간단히 표시된다.

$$\frac{\Delta\Phi}{PL} = -\frac{\beta(1-2\mu)}{E} + \frac{\beta n^2}{2E} (1-2\mu)(2p_{12}+p_{11}) \quad (14)$$

식 (14)에 나타난 대표적인 파라메타들을 살펴보기 위한 He-Ne 레이저광원과 단일모드 광섬유의 파라메타는 다음과 같다.

- 평균 굴절율 ( $n$ ) = 1.456
- 전파상수 ( $\beta = 2\pi n/\lambda$ ) =  $1.446 \times 10^7$  [  $m^{-1}$  ]
- 탄성율 ( $E$ ) =  $7.2 \times 10^{10}$  [  $N/m^2$  ]
- 포아송율 ( $\mu$ ) = 0.17
- 파장 ( $\lambda$ ) = 0.6328 [  $nm$  ]
- 광섬유 직경 =  $125 \pm 3$  [  $\mu m$  ]
- 코어 직경 ( $D$ ) =  $5.6 \pm 0.5$  [  $\mu m$  ]
- 자켓 직경 =  $500 \pm 50$  [  $\mu m$  ]
- 감쇠율 = 15 [  $dB/Km, max.$  ]
- 압력감지 동작길이 =  $30 \times 10^{-3}$  [  $m$  ]
- 광탄성 계수 ( $P_{11}$ ) = + 0.121
- 광탄성 계수 ( $P_{12}$ ) = + 0.270

$b-V$  산란곡선의 단일모드영역에서의  $V \approx 2.4$ 이고  $db/dV = 0.5$ 이다. (이들 근사값들은 약 20%의 확도를 가짐.) 코어의 지름은 자유공간 파장의 4 - 10 배가 적당하므로  $D = 5.6 \pm 0.5[\mu m]$ 로 선정하였으며 이들 값을 이용하여 식 (14)로부터 산출된  $\Delta\Phi/PL$  값은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta\Phi}{PL} = -13.26 \times 10^{-5} + 9.29 \times 10^{-5} \text{ [rad/pa} \cdot \text{m]} \\ = 3.97 \times 10^{-5} \text{ [rad/pa} \cdot \text{m]}$$

따라서  $2\pi \text{rad}$  (one - fringe) 변환 시 요구되는 단위 길이 · 압력 ( $\Delta PL$ )은  $\Delta P \cdot L|_{2\pi \text{rad}} = 158 \text{ KPa} \cdot \text{m} \approx 23 \text{ psi} \cdot \text{m}$  가 된다.

### 3. Mach-Zehnder 간섭계의 구성

본 연구에서는 광섬유 간섭계의 계측 광통로에 유기된 스트레인에 의한 압력을 검출하기 위한 방법으로 그림 1.에 보인 것과 같이 Mach-Zehnder 간섭계로 시스템을 구성하였다. 여기서는 헤테로다인(heterodyne) 방식<sup>[12]</sup>보다 위상잡음에 유리하고 훨씬 미소한 위상변화까지 측정이 가능한 능동 호모다인(active homodyne)<sup>[13]</sup>방식을 채택하였다.

본 시스템의 구성요소는 다음과 같다.

먼저, 광원으로는 He-Ne 기체 레이저(Spectra Physics, model 138-02, 파장 : 632.8 nm)를 이용하였다. 광원으로부터 방출된 레이저 광은 편극기(polarizer)를 통과하게 된다. 편극기 뒷

단에는 1/8" 인 직경을 가진 볼록렌즈가 연결되어, 세 축방향 조절용 장착 지지대에 장착된 광섬유와의 레이저 광 출력의 입사가 최적이 되도록 초점을 조정하여 설치하였다.

광섬유로 입사된 레이저 광은 기준 광통로와 계측 광통로의 광분할 기능을 가진 광섬유 방향성 결합기 (directional coupler)에 의해 간섭계의 두 광분할 통로로 나누어진다. 분할된 한편의 기준 광통로에는 구부림이나 비틀림에 의해 발생된 타원 편극면의 회전을 원하는 출력의 선형 편극상태로 변환시켜주기 위한 편극제어기(polarization controller)가 설치되고, 위상추적 케환보상기의 케환신호에 의한 위상변조를 행하기 위해서 PZT-원통(Channel사 제품, 25.4 mm $\phi$  두께 : 3.17 mm, 압전상수 :  $4 \times 10^{-10}$  m/V)에 광섬유를 34회 감아서 만든 위상변조기가 위치한다.

다른 한편의 계측 광통로에는 압력감지가 가능하도록 중앙부분이 반 개방형으로 절단된(길이 : 3Cm) U자형의 동파이프( $\phi$  : 5 mm)에 자켓 부분을 제거한(길이:3Cm 부분만) 센서광섬유를 삽입하였다. 압력감지센서 광섬유에는 수중의 부력을 일으킬 수 있는 3mm 두께의 직사각형(10 $\times$ 15 mm) 코르크 재질이 부착되어 있다. 반 개방형으로 절단된 센서광섬유의 양측은 동파이프에 본드로 고정하고 동파이프는 밀폐시켜 감지부분(3Cm)에서만 압력변화를 일으키도록 제작하였다. 제작된 광섬유 압력센서는 기준 압력센서와 함께 유리수조속에서 일정한 높이에 설치하고, 압력변화는 수조의 높이를 조절하여 가능하도록 조절용 디스크를 수조 밑바닥에 여러장 설치하여 실험장치를 제작하였다. 이렇게 해서 두 광통로를 지난 레이저 광은 다시 방향성 결합기에 의해 광분할되어 각각의 편극기를 지나, 출력광량을 조절하여주는 광조절기(iris diaphragm)를 거쳐 출력광을 전기적 신호로 변환시켜주는 광검지기(photo detector)로 입력되어 측정신호를 출력하게 되고, 한편으로는 위상추적 케환보상기<sup>[14]</sup>의 케환신호로도 이용된다. 보상기의 출력은 PZT-원통에 케환되어 시스템을 안정화시키게 된다.

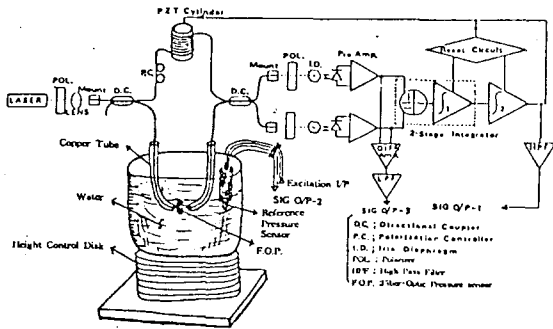


그림1. 압력측정 Mach-Zehnder 간섭계구성도.  
FIG.1. Block diagram of the Mach-Zehnder interferometer for the pressure measurement.

#### 4. 수중압력 실험 및 고찰

##### 4.1 실험

그림 1.의 하단에 보인 것과 같이 유리수조 내에서의 압력센서 장치대에 비교기준 압력센서를 광섬유 압력센서와 똑같은 높이가 되도록 고정된 후, 수조 밑에 설치된 높이조절용 디스크를

증감시키면서 변화하는 압력값을 측정(sig. o/p-3)하였다. 비교기준 압력센서로는 GOULD사(U.S.A) 제품·모델 PA-822를 이용하였으며, 이 센서의 압력측정(sig. o/p-2) 범위는 0-15psia이고 스트레인지에지 형태의 압력센서이다.

처음에는 대기중의 압력을 측정한 결과, 그림 2.에 초기값과 같이 광섬유 압력센서로는 1mV이고 비교기준 압력센서로 측정된 값(1psia = 2.2455mV)과 비교하여 물리적 환산값은 9 mpsia/mV이다.

#### 4.2 수중 깊이에 따른 압력실험 결과 및 검토

수조속에서의 깊이에 따른 실험결과를 반복측정한 결과를 그림 2.에 보인다. 재현성이 뛰어나고 비교측정 센서에 비교하여 미세압력 반응도가 우수하여 아주 작은 압력변화 측정에 매우 용이함을 알 수 있다. 측정된 감도는 100  $\mu$ psia로 나타났다.

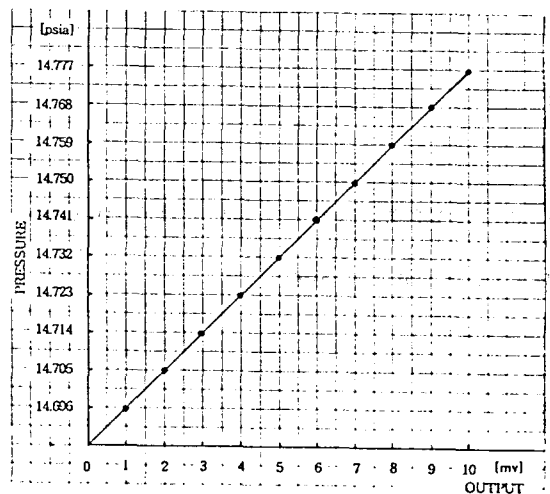


그림2. 수중에서의 광섬유 압력 센서 측정자료.  
FIG.2. Pressure measurement data by the fiber optic pressure sensor in water.

#### 5. 결론

단일모드 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 간단한 압력센서의 기본 구성과 실험을 통하여 간섭계의 압력반응을 측정하였다. 비교기준 센서와 비교하여 반응도가 우수하고 그 변화량이 잘 일치함을 확인하였다. 시스템의 압력감도는 100  $\mu$ psia로 측정되었으며, 앞으로 광섬유 압력센서의 감지구조 부분을 개선하여 고감도(수  $\mu$ psia이하)에 대한 압력측정은 물론 동적실험을 통하여 광섬유 압력센서의 확도와 감도를 개선하고자 한다.

#### 참고문헌

- [1] J. A. Bucaro, H. D. Dardy and E. Carome, "Fiber optic hydrophone," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 62, pp. 1302-1304, 1977.
- [2] J. H. Cole, R. L. Johnson and P. B. Bhuta, "Fiber optic detection of sound," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 62, pp.

1136-1138, 1977.

- [3] B. Culshaw, E. Davies and S. Kingsley, "Acoustic sensitivity of optical-fiber waveguides," *Electron. Lett.*, vol. 13, pp. 760-761, 1977.
- [4] B. Culshaw and D. I. N. Davies, *Proceedings of the 4th European Conference on Optical Communication*, Genoa, Italy 12-15, September, 1978.
- [5] J. A. Bucaro and T. R. Hickman, "Measurement of sensitivity of optical fiber for acoustic detection," *Appl. Opt.*, vol. 18, pp. 938-940, 1979.
- [6] J. N. Fields, C. P. Smith, C. K. Asawa, R. T. Morrison, O. G. Ramer, G. L. Tangonan and M. K. Barnoski, in *Conf Proc. Opt. Fiber Commun.*, Washington D. C. Mar. 6-8, 1979, pp. 58-59;  
also J. N. Fields, C. K. Asawa, O. G. Ramer and M. K. Barnoski, "Fiber optic pressure sensor," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 67, pp. 816-818, 1980.
- [7] G. B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," *Appl. Opt.*, vol. 18, pp. 1445-1448, 1979.
- [8] N. Lagakos and J. A. Bucaro, "Pressure desensitization of Optical fiber," *Appl. Opt.*, vol. 20, pp. 2716-2720, 1981.
- [9] J. A. Bucaro, N. Lagakos, J. H. Cole and T. G. Giallorenzi, "Fiber-optic acoustic transduction," Chapter in *Physical acoustics, principle and methods*, vol. 16, (Academic press, N. Y.), 1982
- [10] D. A. Pinnow, "Elastooptical Materials," in *Handbook of Lasers*, R. J. Pressley, Ed. (CRC, Cleveland, Ohio), 1971.
- [11] G. B. Hocker and W. K. Burns, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-11, 270, 1975; D. B. Keck, in *Fundamentals of Optical Fiber Communications*, M. K. Barnoski, Ed. (Academic, N. Y.), Chap. 1, 1976.
- [12] J. H. Cole, B. A. Danver and J. A. Bucaro, "Synthetic-Heterodyne interferometric demodulation," *IEEE J. Quantum Electron.* QE-18, pp. 694-697, 1982.
- [13] D.A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge and A. B. Tveten, "Elimination of drift in a single mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber," *Appl. Opt.*, vol. 19, pp. 2926-2929, 1980.
- [14] 이기완, 홍봉식, "단일모드 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 안정화를 위한 위상추적 폐환보상기의 설계," 대한전자공학 회 논문지, 제26권, pp. 137-143, 1989.