

〈論 文〉

# 끝단이 막힌 중공 원통형 광섬유 하이드로폰의 감도 해석

## Sensitivity Analysis of Fiber Optic Hydrophone for an End-Capped Hollow Cylinder

이종길\* · 윤형규\*\* · 서인창\*\*

Jongkil Lee, Hyunggyu Yoon and Inchang Seo

(1996년 5월 10일 접수 ; 1996년 6월 7일 심사완료)

**Key Words :** Fiber Optic Hydrophone(광섬유 하이드로폰), Polarization(편광), Normalized Sensitivity(정규화 감도), Mandrel(맨드렐)

### ABSTRACT

Recently, fiber optic hydrophone is a subject which has attracted as a underwater acoustic sensor. In this paper, a length of optical fiber is bonded to an end-capped hollow cylinder of some elastic material, e. g. aluminum and glass-pyrex. The normalized sensitivity is derived according to the direction of polarization. Derived sensitivity equations are simulated for two different mandrel materials. The results are also compared to the McMahon's results which calculated for an average Pockel coefficient. Based on the numerical simulation normalized sensitivity is propotional to the inner to outer diameter ratio.

#### 기 호 설 명

- $\epsilon_i$  : 광섬유변형률의 직교성분 ( $i=1, 2, 3$ )
- $E^f, E^m$  : 광섬유와 맨드렐의 영률
- $\bar{E}$  : 정규화 탄성률 ( $= E^f / E^m$ )
- $K_o$  : 광파수
- $L$  : 하이드로폰에 감긴 광섬유의 총 길이
- $n$  : 굴절률
- $P$  : 음압
- $P_{ij}$  : Pockel상수(광탄성,  $P_{11}$  및  $P_{12}$ )
- $R_1, R_2$  : 맨드렐의 내부 및 외부 반지름
- $r$  : 하이드로폰에서 광섬유가 감긴 위치
- $\bar{R}$  : 정규화 반경률 ( $= R_1 / R_2$ )
- $\sigma_i$  : 광섬유응력의 직교성분 ( $i=1, 2, 3$ )
- $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  : 맨드렐응력의 직교성분
- $\Delta\phi$  : 광파의 위상차
- $\nu^f, \nu^m$  : 광섬유와 맨드렐의 프와송비

### 1. 서 론

광섬유(fiber optic)를 이용한 센서 기술은 최근에 신호처리 및 다중화(multiplexing) 기술의 발전과 함께 음향, 계측, 기계 및 항공 등의 다양한 분야에서 활발히 응용이 되고 있다. 또한 수중 음향 센서로서 광섬유 하이드로폰(hydrophone)은 별도의 전자장비 없이 원하는 신호를 높은 감도로 감지할 수 있는 잇점때문에 미국 및 유럽 등지에서 매우 적극적으로 연구되고 있다.<sup>(1)</sup> 광섬유 하이드로폰은 광섬유와 광섬유가 감기는 맨드렐(mandrel)로 구성되어 있으며 맨드렐의 구조 및 형상에 따라 음향 신호의 감지 성능 즉, 감도가 매우 민감하게 변한다고 보고되고 있다.<sup>(2-5)</sup> McMahon 등<sup>(2)</sup>은 광섬유 자체에 피복이 된 구조와 맨드렐에 감긴 구조의 감도를 비교 해석하였는데 맨드렐 구조의 하이드로폰이 감도면에서 감지 않은 구조보다 10배 정도 우수함을 보였다.

본 연구에서는 일반적으로 널리 쓰이는 맨드렐의

\*정회원, 국방과학연구소

\*\*국방과학연구소

구조인 양단이 막히고 중공 원통형 광섬유 하이드로폰의 감도를 이론적으로 해석하여 이를 맨드릴의 치수 및 재질에 따라 수치해석하였다. 따라서 본 연구의 결과는 고감도 광섬유 하이드로폰의 설계에 충분히 응용이 되리라고 판단된다.

## 2. 광섬유 하이드로폰의 감도 해석

Fig. 1에는 Mach-Zehnder 간섭계로 구성된 광섬유 하이드로폰의 일반적인 감지 방법을 보였다. 음압이 광섬유에 작용하면 광섬유는 세 방향으로 변형률을 보이고 이에 따라 광(light) 경로차가 발생하여 기준 광섬유(reference fiber)와 간섭을 일으키게 되며 광섬유 하이드로폰은 수중 음향 신호를 감지하게 된다. 수중 음향 신호인 음압은 광섬유 하이드로폰에 압력으로 작용한다.

광섬유를 등방성(isotropic) 탄성체라고 가정하여 음압에 의한 광섬유 자체의 변형은 후크의 법칙(Hooke's law)을 이용하여 구할 수 있다. 즉, 직교 세 방향 변형률  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  및  $\epsilon_3$ 는

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E_f} \{ \sigma_1 - \nu^f (\sigma_2 + \sigma_3) \} \quad (1)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E_f} \{ \sigma_2 - \nu^f (\sigma_1 + \sigma_3) \} \quad (2)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E_f} \{ \sigma_3 - \nu^f (\sigma_1 + \sigma_2) \} \quad (3)$$

로 표현된다. 또한 광섬유에 음파가 작용하면 광섬유에 변형이 생기고 광섬유내를 전파하는 광은 위상변화를 가지게 되며 이 위상변화  $\Delta\phi$ 는 다음의 식으로 표현된다<sup>(3)</sup>. 즉,

$$\Delta\phi = K_{on}L\epsilon_1 - \frac{1}{2}n^3K_oL(\epsilon_1\delta_{12} + \epsilon_2\delta_{11} + \epsilon_3\delta_{12}) \quad (4)$$

만일 하이드로폰의 크기가 음파의 파장보다 훨씬 적다고 가정하면 하이드로폰 본체 표면주위에 미치는

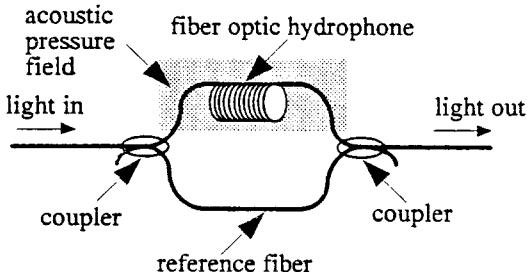


Fig. 1 Fiber optic hydrophone interferometer

순간 음압은 같다고 볼 수 있다.

광섬유 하이드로폰은 광섬유가 감지는 맨드릴의 구조에 따라 감도의 차이가 많이 발생하며 일반적으로 많이 쓰이는 맨드릴은 중공 원통형이다. 천해용에 사용되는 하이드로폰은 맨드릴을 셀구조(원통의 두께가 외경의 1/20 이하)로 제작하여도 수압에 큰 영향을 받지 않으나 수심이 비교적 깊은 곳에서 사용이 될 경우에는 수압이 하이드로폰의 구조에 영향을 미쳐 정적 변위를 발생시킨다. 이 변위는 실제 음향신호와 상관없는 잡음신호로 변형되어 음향신호 처리에 영향을 끼치게 된다. 본 연구에서는 양단이 막힌 중공 원통형 맨드릴을 해석 대상으로 선정하였으며 수압의 영향은 고려하지 않았다. Fig. 2에서와 같이 외부 음압  $P$ 가 맨드릴의 표면에 힘으로 작용할 때 이것에 발생하는 응력은 직교 세축 방향으로  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  및  $\sigma_z$ 가 발생되며 이것은 각각<sup>(3)</sup>

$$\sigma_r = P \left[ \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{R_2^2 R_1^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \right] \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = P \left[ \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{R_2^2 R_1^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \right] \quad (6)$$

$$\sigma_z = P \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (7)$$

로 표현되며 여기서 광섬유의 직경은 매우 작아 맨드릴의 직경에 비하여 무시할 수 있다고 보면  $r = R_2$ 로 볼 수 있다. 무차원수  $\bar{R} = R_1/R_2$ 를 이용하여 다시 쓰면

$$\sigma_r = P, \quad \sigma_\theta = P \left( \frac{1 + \bar{R}^2}{1 - \bar{R}^2} \right), \quad \sigma_z = P \left( \frac{1}{1 - \bar{R}^2} \right) \quad (8)$$

으로 유도된다. 따라서 식 (1)~(8)을 이용하여 식 (4)의 광위상차를 구하면 광섬유 하이드로폰의 감도를 예측할 수 있다.

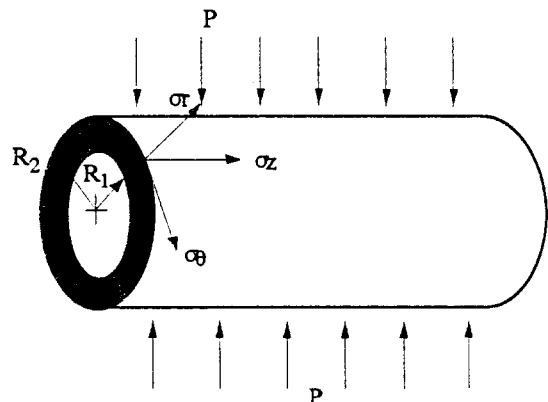
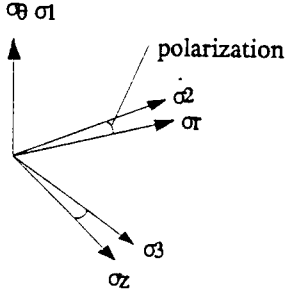


Fig. 2 Mandrel dimensions and stress coordinate



**Fig. 3** Polarization coordinate of the fiber and mandrel( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ : fiber coordinate,  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ : mandrel coordinate)

양끝단이 막힌 중공 원통형 광섬유 하이드로폰에 음압  $P$ 가 작용하면 광섬유가 변형을 일으키게 되는데 이때 광섬유의 길이방향 변형률  $\epsilon_1$ (longitudinal strain)은 맨드릴의 접선방향 변형률  $\epsilon_\theta$ (tangential strain)와 같게 된다. 그러나 광섬유 자체의 반경방향 및 접선방향의 응력,  $\sigma_2$  및  $\sigma_3$ 는 광파의 편광(polarization)에 따라 맨드릴에서의 나머지 두 방향의 응력  $\sigma_r$  및  $\sigma_z$ 에 대칭이 달라지게 된다. Fig. 3에서는 편광에 따른 응력의 상호 대칭을 좌표축으로 보였다. 이것은 다음의 두 경우로 나누어 감도를 계산할 수 있다.

**2.1**  $\sigma_1 = \sigma_\theta, \sigma_2 = \sigma_r$  및  $\sigma_3 = \sigma_z$ 인 편광의 경우 맨드릴에 접선방향으로 발생하는 변형률  $\epsilon_\theta$ 는

$$\begin{aligned} \epsilon_\theta &= \frac{1}{E^m} [\sigma_\theta - \nu^m (\sigma_r + \sigma_z)] \\ &= \frac{P}{E^m} \left[ \frac{1 + \tilde{R}^2}{1 - \tilde{R}^2} - \nu^m \frac{2 - \tilde{R}^2}{1 - \tilde{R}^2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

로 표현되며 이것은 광섬유에서의  $\epsilon_1$ 과 같으므로 식 (1)을 이용하여  $\sigma_1$ 을 구하면

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= P \left[ \frac{E^f (1 + \tilde{R}^2)}{E^m (1 - \tilde{R}^2)} - \frac{E^f \nu^m (2 - \tilde{R}^2)}{E^m (1 - \tilde{R}^2)} \right] \\ &\quad + \nu^f P \frac{2 - \tilde{R}^2}{1 - \tilde{R}^2} \end{aligned} \quad (10)$$

로 표현된다. 또한  $\sigma_2 = \sigma_r$  및  $\sigma_3 = \sigma_z$ 인 관계를 이용하여 식 (1)~(3)에 식 (8)을 대입하여 세축방향의 변형률을 구하면

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= P \left[ \frac{1 + \tilde{R}^2}{E^m (1 - \tilde{R}^2)} - \frac{\nu^m (2 - \tilde{R}^2)}{E^m (1 - \tilde{R}^2)} \right] \quad (11) \\ \epsilon_2 &= \frac{P}{E^f} \left[ 1 - \frac{E^f \nu^f (1 + \tilde{R}^2)}{E^m (1 - \tilde{R}^2)} + \frac{E^f \nu^f \nu^m (2 - \tilde{R}^2)}{E^m (1 - \tilde{R}^2)} \right] \end{aligned}$$

$$- (\nu^f)^2 \frac{2 - \tilde{R}^2}{1 - \tilde{R}^2} - \frac{\nu^f}{1 - \tilde{R}^2} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_3 &= \frac{P}{E^f} \left[ \frac{1}{1 - \tilde{R}^2} - \frac{E^f \nu^f (1 + \tilde{R}^2)}{E^m (1 - \tilde{R}^2)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{E^f \nu^f \nu^m (2 - \tilde{R}^2)}{E^m (1 - \tilde{R}^2)} - (\nu^f)^2 \frac{2 - \tilde{R}^2}{1 - \tilde{R}^2} - \nu^f \right] \end{aligned} \quad (13)$$

으로 유도된다. 식 (4)에서 광위상차를 다시 쓰면

$$\frac{\Delta\phi}{K_{on}L} = \epsilon_1 - \frac{1}{2} n^2 (\epsilon_1 \rho_{12} + \epsilon_2 \rho_{11} + \epsilon_3 \rho_{12}) \quad (14)$$

으로 표현되며 광섬유의 변형률 관계식 (11)~(13)을 식 (14)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\phi}{K_{on}L} &= \frac{P}{1 - \tilde{R}^2} \left[ \left\{ \frac{(1 + \tilde{R}^2)}{E^m} - \frac{\nu^m}{E^m} (2 - \tilde{R}^2) \right\} \right. \\ &\quad \times (1 - 0.5 n^2 P_{12}) - \frac{n^2}{2 E^f} \left[ (1 - \tilde{R}^2) \right. \\ &\quad \left. - \frac{E^f}{E^m} \nu^f (1 + \tilde{R}^2) + \frac{E^f}{E^m} \nu^f \nu^m (2 - \tilde{R}^2) \right. \\ &\quad \left. - (\nu^f)^2 (2 - \tilde{R}^2) - \nu^f \right] P_{11} + \left[ 1 \right. \\ &\quad \left. - \nu^f \frac{E^f}{E^m} \nu^f (1 + \tilde{R}^2) + \frac{E^f}{E^m} \nu^f \nu^m (2 - \tilde{R}^2) \right. \\ &\quad \left. - (\nu^f)^2 (2 - \tilde{R}^2) - \nu^f (1 - \tilde{R}^2) \right] P_{12} \left. \right] \end{aligned} \quad (15)$$

으로 유도된다. 식 (15)에서 정규화된 강성비  $\tilde{E} (= E^f/E^m)$ 를 이용하여 양쪽 항을 무차원화시켜 정리하면

$$\begin{aligned} \frac{E^f \Delta\phi}{PK_{on}L} &= \frac{1}{1 - \tilde{R}^2} \left[ \{ \tilde{E} (1 + \tilde{R}^2) - \tilde{E} \nu^m (2 - \tilde{R}^2) \} \right. \\ &\quad \times \{ 1 - 0.5 n^2 P_{12} \} - 0.5 n^2 \{ (1 - \tilde{R}^2) \\ &\quad - \nu^f - \tilde{E} \nu^f (1 + \tilde{R}^2) + [\tilde{E} \nu^f \nu^m \\ &\quad - (\nu^f)^2] (2 - \tilde{R}^2) \} P_{11} + \{ 1 - \nu^f \tilde{E} (1 \\ &\quad + \tilde{R}^2) + [\tilde{E} \nu^f \nu^m - (\nu^f)^2] \\ &\quad \times (2 - \tilde{R}^2) - \nu^f (1 - \tilde{R}^2) \} P_{12} \left. \right] \end{aligned} \quad (16)$$

으로 표시된다. 따라서 광섬유 하이드로폰의 정규화 감도(normalized sensitivity)는 식 (16)을 이용하여 구할 수 있다. 식 (16)에서 정규화 감도는 광섬유의 굴절률  $n$  및 Pockel 계수 등이 일정하다고 볼 때 맨드릴의 내외경비  $\tilde{R}$  및 강성비  $\tilde{E}$ 의 함수임을 알 수 있다.

**2.2**  $\sigma_1 = \sigma_\theta, \sigma_2 = \sigma_z$  및  $\sigma_3 = \sigma_r$ 인 편광의 경우

맨드릴에의 응력 관계식  $\sigma_2 = \sigma_z$  및  $\sigma_3 = \sigma_r$ 을 이용하여 식 (1)~(3)에 식 (8)을 대입하여 광섬유의 세축방향의 변형률을 구하면

$$\epsilon_2 = \frac{P}{E^f} \left[ \frac{1}{1-\bar{R}^2} \frac{E^f \nu^f}{E^m} \frac{1+\bar{R}^2}{1-\bar{R}^2} + \frac{E^f \nu^f \nu^m}{E^m} \frac{2-\bar{R}^2}{1-\bar{R}^2} - (\nu^f)^2 \frac{2-\bar{R}^2}{1-\bar{R}^2} - \nu^f \right] \quad (17)$$

$$\epsilon_3 = \frac{P}{E^f} \left[ 1 - \frac{E^f \nu^f}{E^m} \frac{1+\bar{R}^2}{1-\bar{R}^2} + \frac{E^f \nu^f \nu^m}{E^m} \frac{2-\bar{R}^2}{1-\bar{R}^2} - (\nu^f)^2 \frac{2-\bar{R}^2}{1-\bar{R}^2} - \frac{\nu^f}{1-\bar{R}^2} \right] \quad (18)$$

따라서 광섬유 하이드로폰의 정규화 감도는

$$\begin{aligned} \frac{E^f \Delta \phi}{PK_{on} L} = & \frac{1}{1-\bar{R}^2} \{ [\bar{E}(1+\bar{R}^2) - \bar{E} \nu^m (2-\bar{R}^2)] \\ & \times [1 - 0.5n^2 P_{12}] - 0.5n^2 \{ [1 - \nu^f \bar{E} \\ & \times (1+\bar{R}^2) + [\bar{E} \nu^f \nu^m - (\nu^f)^2] (2-\bar{R}^2) \\ & - \nu^f (1-\bar{R}^2)] P_{11} + [1-\bar{R}^2 - \nu^f \\ & - \bar{E} \nu^f (1+\bar{R}^2) + [\bar{E} \nu^f \nu^m \\ & - (\nu^f)^2] (2-\bar{R}^2)] P_{12} \} \} \quad (19) \end{aligned}$$

로 표현된다. 따라서 광섬유 하이드로폰의 정규화 감도(normalized sensitivity)는 식 (19)를 이용하여 구할 수 있다. 식 (16)과 같이 식 (19)에서도 정규화 감도는 광섬유의 굴절률  $n$  및 Pockel 계수 등이 일정하다고 볼 때 맨드릴의 내외경비  $\bar{R}$  및 강성비  $\bar{E}$ 의 함수임을 알 수 있다.

### 3. 수치해석 및 결과

광섬유 하이드로폰의 정규화 감도로 유도된 식 (16) 및 (19)를 이용하여 맨드릴의 내외경비 및 강성비에 따른 감도를 수치해석하였다. 여기서 사용된 광섬유는 일반적으로 많이 사용되는 용융 실리카(fused silica)를 선택하였으며 이것의  $E^f=73$  GPa, 프와송비  $\nu^f=0.17$ , 굴절률  $n=1.456$ , Pockel 상수

$P_{11}=0.12$ ,  $P_{12}=0.27$ 로 계산하였다. 또한 알루미늄의 탄성계수  $E^m=71$  GPa, 프와송비  $\nu^m=0.355$ 로 계산하였으며 glass(pyrex)는  $E^m=62$  GPa, 프와송비  $\nu^m=0.24$ 로 계산하였다. Fig. 4는 맨드릴의 재질을 알루미늄 및 glass(pyrex)로 하였을 경우 정규화 반경에 따른 감도 변화를 보인 것이다. Fig. 4에서 정규화 감도는 맨드릴의 내외경비, 즉 정규화 반경이 커질수록 증가함을 알 수 있다. 또한 편광 #1은 편광 #2의 경우에 비하여 감도 계산에 약간의 차이를 보이나  $\bar{R}=0.8$ 일 때 약 15% 정도의 편차를 보였다. Glass(pyrex)의 경우는 알루미늄의 경우보다 탄성계수의 값이 약 87.3% 정도이며 이것의 정규화 감도 특성은 알루미늄의 경우보다 다소 우수함을 관찰하였다.  $\bar{R}$ 의 값이 0.8보다 크면 맨드릴은 셸(shell) 구조로 되어 식 (5)~(8)들의 응력 관계식은 수정되어야 한다. 본 논문에서는  $\bar{R}$ 의 값이 0.8 이하인 경우로만 제한하였다.

McMahon 등<sup>(3)</sup>은 광섬유에서의 편광이 임의 방향일 때 감도해석을 하였다. 즉, Pockel상수값을  $P_{11}$  및  $P_{12}$ 의 평균값  $P_{av}=(P_{11}+P_{12})/2$ 으로 감도식을 아래와 같이 유도하였다. 즉,

$$\begin{aligned} \frac{E^f \Delta \phi}{PK_{on} L} = & \frac{1}{1-\bar{R}^2} \{ [(1+\bar{R}^2) - \nu^m (2-\bar{R}^2)] \\ & \times (1 - 0.5n^2 P_{12}) - 0.5n^2 P_{av} \\ & [(2-\bar{R}^2) \{ (1-\nu^f - 2\nu^m \nu^m) \bar{E}^{-1} \\ & + 2\nu^f \nu^m \} - 2\nu^f (1+\bar{R}^2)] \} \quad (20) \end{aligned}$$

또한 McMahon 등<sup>(3)</sup>은 맨드릴을 알루미늄, lucite 및 polyethylene 등의 재질로 구분하여 감도의 변화량을 관찰하였다. Fig. 5는 McMahon 등<sup>(3)</sup>이 광섬유의 편광 현상이 임의각으로 되었을 때 Pockel상수값

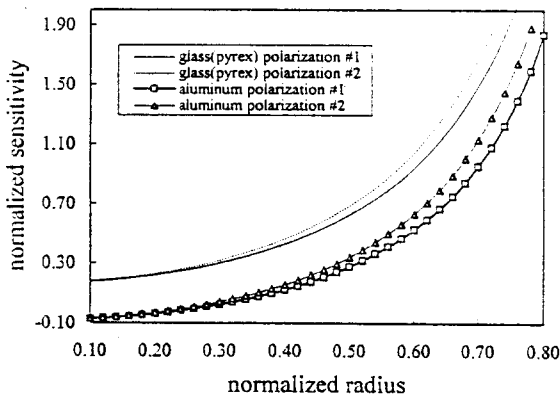


Fig. 4 Normalized sensitivities for different mandrel materials(aluminum and glass-pyrex)

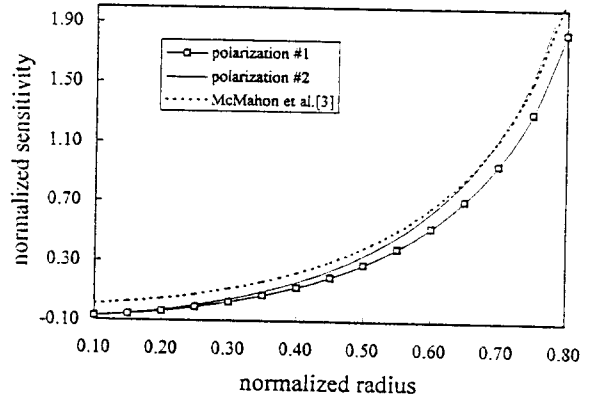


Fig. 5 Normalized sensitivities comparison to the McMahon et al.<sup>(3)</sup> for the case of aluminum

을  $P_{11}$  및  $P_{12}$ 의 평균값으로 감도식을 유도하여 식 (20)으로 제안한 것을 수치해석하여 식 (16)과 (19) 등의 결과와 비교하였다. 이때 맨드럴의 재질은 알루미늄으로 선택하였다. Fig. 5에서와 같이 광섬유의 편광방향은 감도해석에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

그러나 광섬유 하이드로폰의 본래 사용 목적이 수중에 설치하여 음압을 감지하는 것이므로 수심에 따른 수압의 영향을 고려한다면 맨드럴 구조물의 정적 변형률(hydrostatic strain)을 계산하여 구조물의 강인성 측면에서 설계하는 것이 바람직하다고 본다.

#### 4. 결 론

수중 음향센서로서 최근에 많이 연구되고 있는 광섬유 하이드로폰(fiber optic hydrophone)의 성능을 예측하기 위하여 광섬유의 편광특성(polarization)에 따른 정규화 감도식(normalized sensitivity)을 유도하였다. 본 연구에서 사용된 하이드로폰은 광섬유가 끝단이 막힌 중공 원통형 맨드럴(mandrel)에 감긴 구조이며 음압이 하이드로폰에 작용할 때 응력 관계식을 이용하여 정규화 감도식을 유도하였으며 유도된 감도식을 맨드럴의 내외경비에 따라 특성을 수치 해석하였다. 균일한 재질의 광섬유에서 맨드럴의 내외경비의 값이 클수록 그리고 맨드럴의 탄성계수의 값이 작을수록 감도가 증가함을 관찰하였다.

#### 참 고 문 헌

(1) 이종길, 윤형규, 서인창, 1996, "광섬유 하이드로폰 및 소나 기술 현황," 국방과 기술, 제205호, pp. 48~61.

(2) Nash, P. J. and Keen, J., 1990, "Design and Construction of Practical Optical Fiber Hydrophones," Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 12, Part 4, pp. 201~212.

(3) McMahon, G. W. and Cielo, P. G., 1979, "Fiber Optic Hydrophone Sensitivity for Different Sensor Configurations," Applied Optics, Vol. 18, No. 22, pp. 3720~3722.

(4) McDearmon, G. F., 1987, "Theoretical Analysis of a Push-Pull Fiber-Optic Hydrophone," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-5, No. 5, pp. 647~652.

(5) Bucaro, J. A. and Dardy, H. D., 1977, "Fiber-Optic Hydrophone," Journal of Acoustical Society of America, 62(5), pp. 1302~1304.

(6) Dandridge, A. and Kersey, A. D., 1988, "Overview of Mach-Zehnder Sensor Technology and Applications," Fiber Optic and Laser Sensors VI, SPIE Vol. 985, pp. 34~52.

(7) Hocker, G. B., 1979, "Fiber-Optic Acoustic Sensor with Composite Structure: an Analysis," Applied Optics, Vol. 18, No. 21, pp. 3679~3683.

(8) Price, H. L., 1979, "On the Mechanism of Transduction in Optical Fiber Hydrophones," Journal of Acoustical Society of America, 66(4), pp. 976~979.

(9) Shajenko, P., Flatley, J. P. and Moffett, M. B., 1978, "On Fiber-Optic Hydrophone Sensitivity," Journal of Acoustical Society of America, 64(5), pp. 1286~1288.

(10) Spilman, W. B. and Gravel, R. L., 1980, "Moving Fiber-Optic Hydrophone," Optics Letter, Vol. 5, No. 1, pp. 30~31.