

<논 문>

## 중공 원통형 광섬유 하이드로폰의 감도 해석

### Sensitivity Analysis of Fiber Optic Hydrophone for Hollow Cylindrical Mandrel

김정석\* · 윤형규\*\* · 설재수\*\* · 남성현\*\*

J. S. Kim, H. K. Yoon, J. S. Seul and S. H. Nam

(1999년 2월 6일 접수 : 1999년 3월 18일 심사완료)

**Key Words** : Fiber Optic Hydrophone(광섬유 하이드로폰), Sensitivity(감도), FEM(유한요소법), Sensitivity Analysis(감도해석), Sensitivity Measurement(감도실험)

#### ABSTRACT

Recently, fiber optic hydrophone is a subject which has attracted as a underwater acoustic sensor. In this study, Finite element modeling of fiber optic hydrophone for hollow cylindrical mandrel was performed and the acoustic sensitivity was calculated to estimate the performance of single element fiber optic hydrophone. And acoustic sensitivity was measured in acoustic water tank to verify the result of simulation. The result of FE analysis and experiment is  $-126$  dB re rad/ $\mu$ Pa and  $-128$  dB re rad/ $\mu$ Pa respectively.

#### 1. 서 론

공간섭계를 이용한 광섬유 하이드로폰은 기존의 압전형 음향센서에 비해 감도가 상대적으로 높고, 극한 조건에서도 사용될 수 있으며, 사용 주파수 대역의 조정이 용이하다는 등의 장점을 가지고 있어서, 현재의 음향탐지 시스템을 보완할 수 있는 유망한 소자로서 주목을 받고 있다.

1970년 처음으로 손실이 작은 광섬유가 개발된 이래로 그에 따른 광학부품과 광섬유의 성능이 향상됨에 따라 70년대 후반부터 광섬유 하이드로폰의 개념이 제시되었다. 미국에서는 NRL(Naval Research Laboratory), 영국은 Plessey사 등에서 광섬유 하이드로폰의 연구가 시작되었고, 80년대부터 본격적인 연구가 수행되어 다양한 연구결과가 꾸준히 발표되

었는데 현재의 광섬유 하이드로폰 기술은 압전소자를 이용한 센서들과 경쟁할 만한 위치에 와있고 미래의 소나 시스템에 적용될 수 있는 기술로 여겨지고 있다.

광섬유 하이드로폰은 크게 수중에서 외부로부터 오는 음향신호를 감지하는 음향 감지부와 이 감지부를 구동하고 수신된 신호를 처리하는 신호처리 시스템으로 나누어진다.

일반적으로 음향감지부는 광섬유와 광섬유가 감지는 맨드릴 구조로 구성되어지고 맨드릴의 구조, 형상 및 재료에 따라 음향신호의 감지성능인 감도가 매우 민감하게 변한다고 알려져 있으며<sup>(1~4)</sup>, 최근에는 중공 원통형 맨드릴 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

우수한 성능의 광섬유 하이드로폰을 제작하기 위해서는 각 설계변수에 따른 감도특성 실험이 필수적이다. 그러나, 한 개의 광섬유 하이드로폰 감지부를 제작하는데는 많은 시간과 노력이 요구되고, 안정적으로 감도를 측정할 수 있는 실험기법 확립도 많은

\* 정회원, 국방과학연구소 수중음향센서연구실

\*\* 국방과학연구소 수중음향센서연구실

어려움이 따른다. 즉, 모든 설계변수 변화에 따른 실험적 검증은 현실적으로 불가능하므로, 설계변수에 따른 최적설계를 수행한 후 최소한의 감도실험을 위한 하이드로폰 감지부를 제작해야 한다.

이를 위해서는 설계변수에 따른 감도변화를 예측할 수 있는 시뮬레이션 기법이 개발되어야 하고, 이를 검증할 수 있는 안정적 실험방법도 확립되어야 한다.

본 연구에서는 중공 원통형 광섬유 하이드로폰에 대한 감도를 예측할 수 있는 시뮬레이션 기법으로 FEM을 이용한 방법을 소개하고, 이 방법의 타당성을 검증하기 위한 감도측정 실험을 수행하여 비교하였다.

## 2. 맨드릴형 광섬유 하이드로폰의 감도

광섬유 하이드로폰은 수중에 노출된 감지부와 음향차폐된 기준 광섬유를 통과한 광의 위상차에 의해 수중에서 발생된 음향신호를 감지하는데, 감도는 단 위음압에 따른 광섬유의 위상차로 표현되며<sup>(1)</sup>, 광이 3차원 좌표계의 1축 방향으로 진행된다면 광의 편광 상태에 따라 위상차는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\phi = \begin{cases} nkl\epsilon_1 - \frac{1}{2} n^3kl\{p_{11}\epsilon_2 + p_{12}(\epsilon_1 + \epsilon_3)\} \\ nkl\epsilon_1 - \frac{1}{2} n^3kl\{p_{11}\epsilon_3 + p_{12}(\epsilon_1 + \epsilon_2)\} \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $n, k, l$ 은 각각 광섬유의 굴절률, 광의 전파상수, 광섬유의 길이이고,  $\epsilon_i$  와  $p_{ij}$  는 각각 외부 음압에 의해 광섬유에 발생하는 변형률과 광-탄성 Pockel 상수이다. 한편, 광파의 편광상태에 따라 변형률이 결정되지만, 각 편광상태에 따른 위상 변화 값의 차이를 무시할 수 있으므로<sup>(5)</sup>, 본 연구에서는 평균 Pockel 상수를 도입하여 다음과 같이 감도를 평가하였다<sup>(2)</sup>.

$$\Delta\phi = nkl\epsilon_1 - \frac{1}{2} n^3kl\{p_{12}\epsilon_1 + p_{avg}(\epsilon_2 + \epsilon_3)\} \quad (2)$$

위의 감도식은 두 개의 항으로 구성되어 있는데, 첫 번째 항은 광섬유의 축방향 변형률에 의한 위상 변화를 나타내고, 두 번째 항은 축방향 및 반경방향의 변형률에 의한 광섬유의 굴절률 변화에 따른 광-탄성 효과를 나타낸다. 이 두 항은 서로 상쇄되는 경향이 있으나 일반적으로는 길이 변화량이 더 큰 것으로 알려져 있다. 광섬유 재료로 많이 사용되는 용융 silica로 제조된 광섬유의 Pockel 상수  $p_{11}$ ,

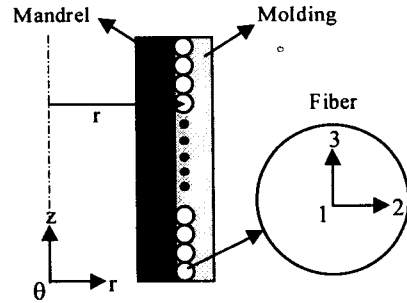


Fig. 1 Mandrel type hydrophone

$p_{12}$  는 각각 0.121, 0.27이고 굴절률  $n$ 은 1.456이며, 주 변의 음압  $P$ 에 의한 광섬유의 변형률  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  를 구할 수 있다면 음압에 의한 광섬유 하이드로폰의 위상 변화량  $\Delta\phi$  를 구할 수 있다.

한편, Fig. 1과 같은 맨드릴형 광섬유 하이드로폰의 감도를 평가하기 위해 광섬유 길이변화를 하이드로폰의 전체 좌표계(원통좌표계)를 이용해 다시 쓰면, 다음과 같다<sup>(6)</sup>.

$$\Delta l = l(\epsilon_r + \epsilon_\theta) \quad (3)$$

즉, 외부 음압에 대한 광섬유층의 변형률  $\epsilon_\theta$ ,  $\epsilon_r, \epsilon_z$  을 각각,  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  로 치환하고 식 (3)을 이용해 정리하면 다음과 같이 맨드릴형 하이드로폰의 감도식을 얻을 수 있다.

$$\Delta\phi = nkl(\epsilon_r + \epsilon_\theta) - \frac{1}{2} n^3kl\{p_{12}\epsilon_\theta + p_{av}(\epsilon_r + \epsilon_z)\} \quad (4)$$

## 3. FEM을 이용한 감도해석

외부로부터 음압을 받는 광섬유 하이드로폰을 모델링하기 위해 본 연구에서는 정적/동적 유한요소 해석으로 널리 사용되어지는 MSC/Nastran<sup>(7)</sup>을 사용하여 주파수에 따른 광섬유의 변형률을 계산하여 감도를 평가하였다.

Fig. 2는 제작된 광섬유 하이드로폰을 유한요소 모델링한 것을 보이고 있는데, 대칭성을 고려하여 1/8 모델을 사용하였으며, 사용된 요소는 8절점을 가지는 3차원 brick element이고, 총 요소 개수는 55728 개이다. Table 1은 해석에 사용된 물성치이고, 맨드릴의 길이는 14 mm, 이 중 광섬유가 감진 부분은 100 mm이고, 이 부분의 두께는 2 mm이다. 광섬유층의 두께는 0.5 mm이고, 몰딩층의 두께는

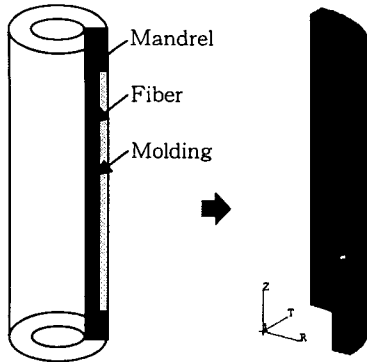


Fig. 2 Finite element modeling of fiber optic hydrophone

Table 1 Material properties

Material	E(GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Mandrel	3.99	0.398	1150
Fiber	19.56	0.3417	1404
Molding	0.035	0.45	960

2.5 mm이다. 한편, 코어, 클래딩, 2 개의 코팅층으로 구성된 광섬유의 물성치는 각각의 물성치를 대수적으로 평균하여 사용하였다.

Fig. 2과 같이 감지부를 모델링하고 몇 층으로 권선된 광섬유층을 얇은 실린더 층으로 모델링하여 광섬유층에서 발생하는 평균변형률을 이용하여 다음과 같이 감도를 평가하였다.

$$\Delta\phi = nkl(\overline{\epsilon_r} + \overline{\epsilon_\theta}) - \frac{1}{2} n^3 kl \{ p_{12} \overline{\epsilon_\theta} + p_{av} (\overline{\epsilon_r} + \overline{\epsilon_z}) \} \quad (5)$$

$$\overline{\epsilon_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\epsilon_{ij}); \quad n : \text{광섬유층의 층요소 개수}$$

한편, 제작된 하이드로폰은 방향성 커플러 내장 패키지에 장착하는 부분만을 변위 구속하였고, 광섬유층은 구속조건을 가하지 않았다. 감지부는 약 18 kHz에서 공진하고 외부에 작용하는 음압의 파장보다 감지부의 크기가 상당히 작으므로, 본 연구의 대상인 저주파(1 kHz~5 kHz)에 대해서는 외부 유체를 모델링하지 않고 외부 음압을 평면파로 간주하여 동일한 음압이 감지부 외부에 작용한다고 가정하였다.

외부에서 음압이 작용하면 상대적으로 강성이 떨어지는 맨드릴에 변형을 일으키고, 이 변형이 광섬유층을 변형시켜 내부에 변형률이 발생되게 된다.

맨드릴에는 비교적 균일한 변형이 발생되고, 이로 인해 광섬유층에도 비교적 균일한 변형률을 발생시킨다.

본 해석에서 구해진 음향 감도는 약 -126 dB rad/ $\mu$ Pa 이다.

#### 4. 감도 실험

Fig. 2의 개념으로 설계된 광섬유 하이드로폰 감지부를 제작하여 음향수조에서 수신감도 특성시험을 수행하였다. 하이드로폰은 광섬유 하이드로폰 배열에 적용할수 있도록 5:5 방향성 커플러를 패키지 내에 장착하고 하이드로폰과 일체형을 이루도록 제작하였다. Fig. 3는 하이드로폰-커플러 일체형 구조를 나타낸다.

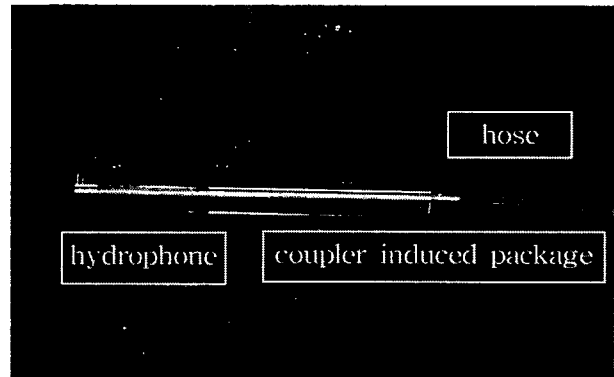


Fig. 3 Prototype of fiber optic hydrophone

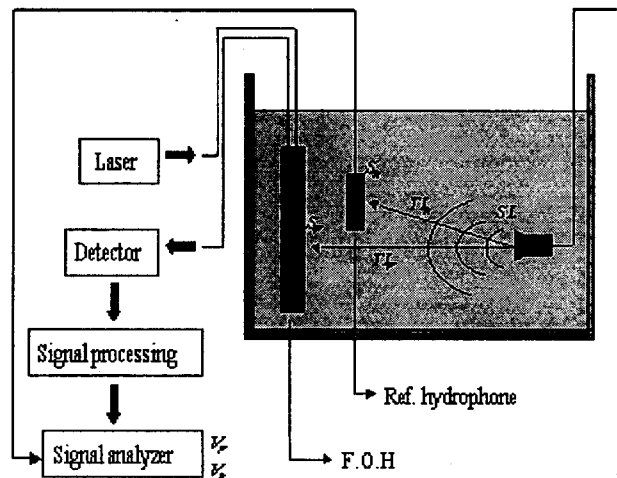


Fig. 4 The concept of sensitivity experiment

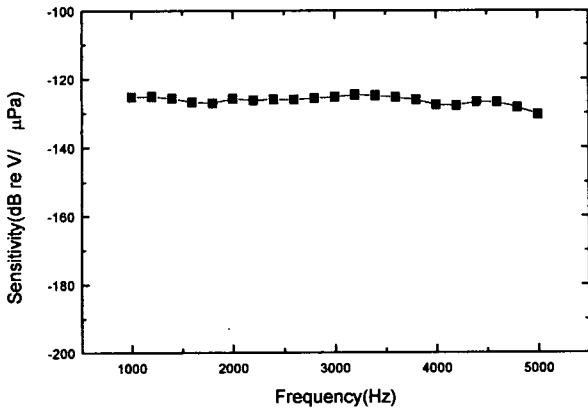


Fig. 5 Sensitivity experimental result (dB re V/μPa)

Nylon 맨드릴에는 약 100 m의 광섬유가 권선되어 있고, 양 끝단은 커플러와 연결되어 있다. 커플러 내장 패키지에 호스가 연결되어 수밀유지 및 광섬유를 보호하도록 하였다. 하이드로폰의 감도를 측정하기 위해 Fig. 4와 같이 수조에서 실험하였다<sup>(8)</sup>. 하이드로폰과 일정한 거리만큼 떨어진 음원으로부터 1 kHz~5 kHz 범위의 신호를 방사하여 기준 하이드로폰(H-23)과 광섬유 하이드로폰에서 얻어진 음압수준을 비교하여 Fig. 5와 같은 실험 결과를 얻었다.

Fig. 5의 결과는 신호 처리부의 주파수 응답특성을 포함하고 있고, 단위 음압에 대한 전압으로 표현되므로, 광섬유 하이드로폰 감지부만의 감도를 평가하기 위해 신호 처리부의 주파수 응답특성을 보상하고, 단위 음압에 대한 위상변화로 환산하여 감도를 계산하였다. 얻어진 감도특성을 FEM 해석결과와

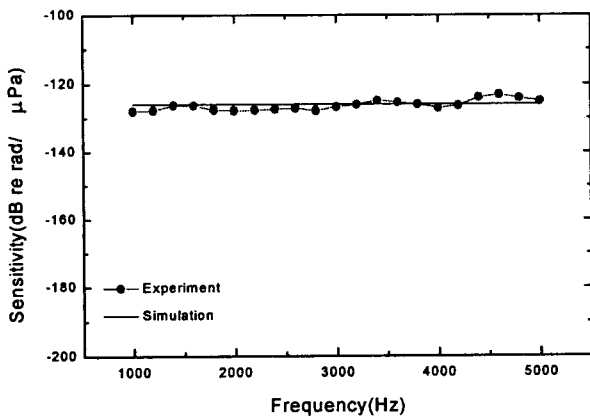


Fig. 6 Sensitivity characteristic of fiber optic hydrophone (dB re rad/μPa)

비교하여 Fig. 6에 나타냈다.

실험 결과는 해석 결과보다 약 2 dB 낮은 -128 dB re rad/μPa의 감도특성을 보이고 있다. 하이드로폰 제작시 권선된 광섬유층과 몰딩 사이에 공기층과 기포가 완전히 제거되고, 광섬유와 맨드릴 간의 접착이 잘되어 맨드릴의 변형이 광섬유에 잘 전달되며, 맨드릴, 광섬유층, 몰딩층의 정확한 물성치가 해석에 사용된다면 보다 정확한 감도를 예측할 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

기존의 압전 세라믹을 이용한 하이드로폰과 비교할 때 많은 장점을 갖고 있는 광섬유 하이드로폰을 개발하기 위해서는 광원, 광수신 소자, 저손실 광섬유 및 광결합기 등 광학 부품의 연구와 더불어 음향 감지부, 광 신호처리 및 배열 확장 등에 관한 연구가 필요하다. 이러한 광섬유 하이드로폰 배열 시스템의 개발을 위해 단일 광섬유 하이드로폰에 대한 정확한 감도 특성의 평가가 우선 선결되어야 하므로 현재 선진국에서 가장 실용화되고 있는 중공 원통형 맨드릴을 이용한 광섬유 하이드로폰의 수신 감도를 예측하고 제작한 후 음향 수조를 이용하여 실험한 결과와 비교하였다.

지금까지 중공 원통형 맨드릴의 해석은 맨드릴을 무한 실린더로 가정하고 응력-변형률의 관계를 이용하여 감도를 계산하는 방식을 사용하였으나 끝단 효과의 영향을 고려할 수 없고, 단면이 일정하지 않고 복잡한 구조를 갖는 맨드릴에는 적용할 수 없어 FEM을 이용하여 맨드릴, 광섬유 및 외부 음향원도우를 모델링하고, 광섬유의 변형률에 따른 광 위상변화를 계산하여 감도를 구하였다.

광섬유 내에서 광 위상의 변화에 기여하는 변수 중 외부 음향신호에 의한 광섬유 길이의 변화, 굴절률의 변화만을 고려하였으며, 광섬유 직경 변화에 의한 영향은 무시하였다.

FEM 해석결과 광섬유 하이드로폰의 감도는 약 -126 dB re rad/μPa 이었고, 실제 제작된 광섬유 하이드로폰을 음향 수조에서 실험한 결과는 약 -128 dB re rad/μPa로 나타났다. 이는 폴리우레탄 음향 원도우를 몰딩할 때 기포를 완전히 제거하지 못한 것과 사용된 물성치의 부정확성에 기인한 것으로 생각된다.

앞으로 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해 광섬유 자체의 모델링 및 정확한 물성치 산출이 요구되지

며, 보다 안정적인 감도실험 기법의 연구도 계속 진행되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Bucaro, J. A. and Dardy, H. D., 1977, "Fiber Optic Hydrophone", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 62, No. 5, pp. 1302~1204.
- (5) 이종길, 윤형규, 서인창, 1996, "끝단이 막힌 중공 원통형 광섬유 하이드로폰의 감도해석", 한국소음진동공학회지, 제 6 권, 제 4 호, pp. 475~479.
- (6) Jong-in Im, Yong-rae Roh, 1998, "Finite element analysis of an interferometric optical fiber hydrophone", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 103, No. 5, pp. 2425~2431
- (7) MSC/NASTRAN Reference Manual.
- (8) 남성현, 양창섭, 1997, "TDM 방식의 2채널 광섬유 하이드로폰 배열 특성 연구", 국방과학연구소 기술보고서(NWSD-517-971574).