

# 실험을 통한 간섭계형 광섬유 하이드로폰의 음향신호 감지성능 연구

°이종길\*, 윤형규\*\*, 설재수\*\*, 김대환\*\*

## Experimental Investigation of Acoustic Signal Detection Performance for the Interferometric Fiber Optic Hydrophone

°Jongkil Lee\*, Hyunggyu Yoon\*\*, Jaesoo Seol\*\*, and Daewhan Kim\*\*

### ABSTRACT

수중음향 센서로서 감도가 높고 제작이 비교적 용이한 광섬유 하이드로폰은 근래에 미국 및 유럽 등지에서 활발히 연구 개발되고 있다. 본 논문에서는 알루미늄 맨드릴에 150m 길이의 광섬유를 감아 광섬유 하이드로폰을 제작 하였다. 광섬유 하이드로폰의 음향 감지 성능을 보기 위하여 Mach-Zehnder형 광간섭계를 구성하고 신호 안정화를 위하여 3x3 광결합기를 이용하였으며 이것을 음향수조에서 실험을 하였다. 음향신호의 주파수를 2kHz로 구동 하였을때 제작된 광섬유 하이드로폰은 음향신호를 안정적으로 감지함을 확인 하였다.

### 1. 서론

광섬유를 이용한 센서의 제작 및 광신호 처리 기술의 발달로 최근에 광섬유 하이드로폰(fiber optic hydrophone)의 배열 기술에 대한 관심이 높아지고 있다[1-5, 12-27]. 또한 광섬유 센서의 감도를 높이기 위한 광간섭계의 개발과 광섬유의 권선 및 맨드릴의 최적 구조 설계에 대하여 이론 및 실험적인 연구가 진행 되었다[6-10].

Spillman[6]등은 100Hz~1kHz의 주파수 범위내의 심해 소음 준위(deep-sea noise level)를 탐지할 수 있는 광섬유 하이드로폰을 제작하여 실험 하였다. 이것은 제작하기 쉽고 간단한 구조이며 저가이기 때문에 실제 광섬유 하이드로폰의 배열에 적용할 수 있다고 하였다. Stanton[7]등은 소음 등가 압력(noise-equivalent pressure)을 계산하는데 광다이오드의 특성을 모델식에 대입하여 유용한 결과를 얻었으며 Price[8]는 광섬유 하이드로폰의 감도는 광센서부의 광섬유 길이와

외부 음압에 밀접한 관계가 있다고 실험적 결과로서 보고 하였다. Shajenko[9]등은 센서부에 감긴 광섬유의 길이 변화는 굴절률(refractive index)의 변화보다 감도에 더 직접적인 영향을 미친다고 하였으며 이를 60kHz의 음원을 이용하여 실험으로 증명 하였다. Bucaro[10]등은 광섬유를 코일 형태로 만들어 센서로 하고 이것의 감지 성능을 실험으로 측정 하였다. Bucaro[10]등의 실험에서 보여준 센서는 광섬유를 맨드릴에 감지 않은 구조라는 점에서 광섬유 배열에 응용하기에는 적합하지 않다.

일반적으로 수중에서의 음향감지는 맨드릴(mandrel)에 광섬유를 여러겹으로 감은 광섬유 하이드로폰을 수중에 설치하고 광간섭계(fiber optic interferometer)를 만든 후 광신호처리를 통하여 음향신호를 감지하는 원리이다. 광섬유가 어떤 음장(sound field)내에서 음압을 받을때 광섬유의 길이 L에 따른 총 위상 변화량(total phase change)은

$$\Delta\phi = knL\varepsilon_1 - \frac{1}{2}n^3kL(\varepsilon_1p_{11} + \varepsilon_2p_{12} + \varepsilon_3p_{21}) \quad (1)$$

\*정회원, 국방과학연구소

\*\* 국방과학연구소

으로 표현되며 여기서  $k$ 는 광파수(optical wavenumber),  $n$ 은 굴절률(refractive index),  $\epsilon_x$ 는 광섬유의 변형률(strain),  $p_{xy}$ 는 Pockel 상수이다. 식 (1)과 같이 광섬유의 위상 변화량 즉, 감도는 광섬유의 길이 및 변형률에 비례하여 증가하게 된다. 따라서 광섬유를 맨드릴에 감는 길이는 일반적으로 약 100~150m 정도이다.

본 논문에서는 끝단이 막힌 알루미늄 맨드릴에 길이가 150m인 광섬유를 감아 하이드로폰을 제작하여 Mach-Zehnder형 광간섭계와 연동으로 구성하고 이것의 수중 음향 신호의 감지 성능을 확인하기 위하여 음향수조에서 실험을 하였다. 광간섭계에서 출력된 신호를 안정적으로 얻기 위하여 3x3 광섬유 방향성 결합기(3x3 directional coupler)를 사용하였으며 음향 신호는 2kHz의 연속 파형으로 구동 하였다.

## 2. 광섬유 하이드로폰의 설계

본 실험에 사용된 광섬유 하이드로폰은 맨드릴에 광섬유가 감긴 형태이며 음향 감지 성능을 높이기 위하여 중공 원통형 알루미늄 맨드릴을 사용 하였다. Fig. 1은 맨드릴의 설계 변수들을 보인 것이며 음향 신호를 2kHz에서 구동 할 때 맨드릴의 고유 진동수를 10kHz 이상으로 하기 위하여 경계 조건이 free-free인 것으로 가정하여 설계하였다.

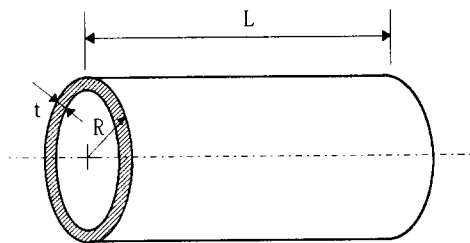


Fig. 1 Dimensions of the mandrel

또한 이것의 고유 진동해석 결과를 표 1에 보였으며 맨드릴의 주요 치수는 표 2와 같다. 표 1에서와 같이 맨드릴의 기본 고유진동수는 11.3kHz로서 설계 목표치 10kHz보다 약간 높다.

설계된 치수로 맨드릴을 제작하여 길이가 150m인 광섬유를 감아 하이드로폰을 제작

하였다. 실험에 사용된 광섬유는 사용 광파장이 1300nm인 단일모드(single mode) 광섬유이며 광손실은 0.1dB/km이다. 하이드로폰의 양쪽 끝단은 음향 신호의 입력을 막기 위해 음향 차단 재질인 corprene를 접착 하였다.

Table 1. Designed values of the mandrel

dimensions	designed value
length, L	6.0 cm
radius, R	2.5 cm
thickness, t	0.25 cm

Table 2. Fundamental natural frequencies of the mandrel under the free-free boundary condition

modes	frequency
radial-axial mode	11.3 kHz
torsional mode	26.2 kHz
radial mode	34.6 kHz
bending mode	39.6 kHz
axial mode	42.7 kHz

Fig. 2에 실제 제작된 광섬유 하이드로폰을 보였다.

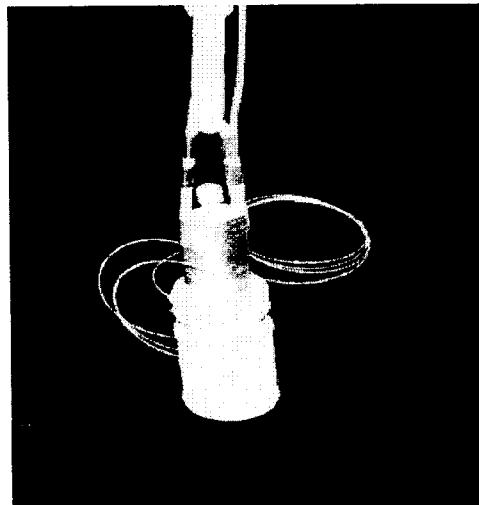


Fig. 2 Photograph of the fiber optic hydrophone

### 3. 광간섭계의 구성

광섬유 하이드로폰의 음향감지 성능을 확인하기 위하여 간섭계를 구성 하였다. 간섭계형 광섬유 센서에는 Mach-Zehnder, Sagnac, Michelson, Ring Resonator 등의 간섭계형이 있으나 본 연구에서는 음향 및 자장의 계측에 주로 이용되는 Mach-Zehnder형을 선택하여 Fig. 3과 같이 간섭계를 구성하였다.

그러나 간섭계형 광섬유 센서는 일반적으로 출력신호의 불안정성의 원인이 되는 신호 소멸 현상이 일어나 음향 감지 성능을 판단하는데 매우 어렵다.

이러한 난점을 극복하기 위하여 Koo[11] 등은 3x3 광섬유 방향성 결합기를 이용하여 신호 소멸 현상을 없애고 안정적인 출력 신호를 얻었다. 즉, 3x3 광섬유 방향성 결합기의 세가지 출력 신호인  $-2\alpha(1+\cos\theta)$ ,  $\beta+\alpha\cos\theta+\gamma\sin\theta$  및  $\beta+\alpha\cos\theta-\gamma\sin\theta$ 의 두 신호(여기서,  $\alpha$ ,  $\beta$  및  $\gamma$ 는 광섬유 결합기의 결합계수를) 더하고 빼주면 위상이  $\pi/2$ 인 광학 신호를 얻어 이를 수동 호모다인 기법으로 신호처리하면 이론적으로 무한대의 동적범위(dynamic range)를 가진 신호를 얻을 수 있다.

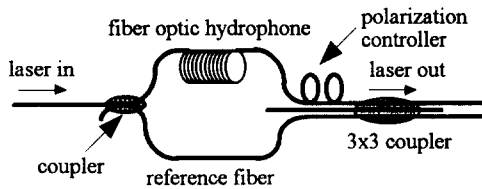


Fig. 3 Mach-Zehnder interferometer using 3x3 directional coupler

따라서 본 연구에서는 3x3 광섬유 방향성 결합기(3x3 directional coupler)를 사용한 수동 호모다인(Passive Homodyne) 신호처리 기법을 이용하여 출력신호의 안정성을 구현 하였다.

### 4. 음향 실험 및 결과

광섬유 하이드로폰의 음향 감지 성능을 보기 위하여 제작된 광섬유 하이드로폰과 광간섭계를 연동하여 음향 수조에서 실험

하였다. Fig. 4에 본 음향 실험의 개략도를 보였다.

음향 수조는 길이, 폭 및 깊이가 각각 18m, 10m, 10m이며 정재파(standing wave)를 제거하기 위하여 약간 찌그러진 형상이고 수조 속은 청수(fresh water)로 채워져 있다.

음원으로는 flextensional형 저주파 음원기(model: BAeSEMA GRP 1500Hz flextensional transducer)를 사용하였고 이것은 주파수 대역 2kHz ~ 4.5kHz에서 평탄한 특성을 가지고 있다. 음원은 함수 발생기(SRS DS345)로 일정한 주파수 및 진폭으로 구동 하였다. 본 실험에 사용된 광원은 1300nm의 파장을 가진 레이저로서 시간에 따라 광원이 비교적 안정적인 Nd-Yag 레이저(LIGHTWAVE 125/126)를 사용 하였다.

실험은 먼저 음원 및 광섬유 하이드로폰을 수조에 담근 후 광을 광섬유 간섭회로에 입사 시킨다. 음압이 광섬유 하이드로폰에 작용하면 광섬유의 길이 및 굴절률이 변화하며 이것의 변화량이 광경로차를 발생시켜 기준 광섬유(reference fiber)와의 광간섭으로 광신호 위상차가 생긴다.

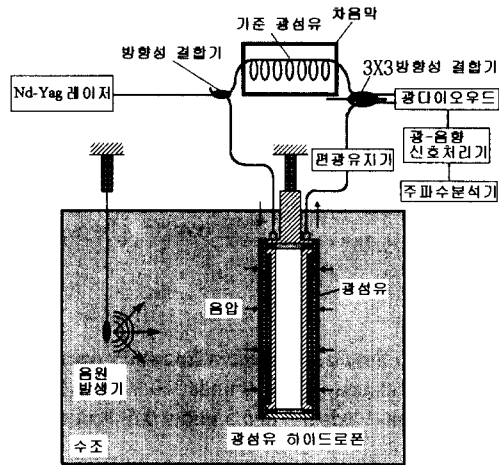


Fig. 4 Experimental set up of fiber optic hydrophone for the sound detection

Fig. 5는 2kHz의 음원으로 수조에서 실험 하였을때 광섬유 하이드로폰이 감지한 음향 신호를 시간축상에 나타낸 것이다.

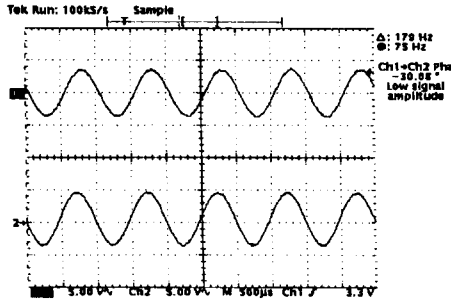


Fig. 5 Acoustic signal in time domain (upper: detected sound signal, bottom: applied sound signal at 2kHz)

이것은 본 실험에서 제작된 광섬유 하이드로폰이 음향신호를 안정적으로 감지함을 확인시켜주는 것이며 그림에서와 같이 음원과 감지 신호간의 위상차는  $30.68^{\circ}$  ( $0.535\text{rad}$ )로 나타났다. Fig. 6은 감지된 음향신호를 주파수 영역에서 본 것이다.

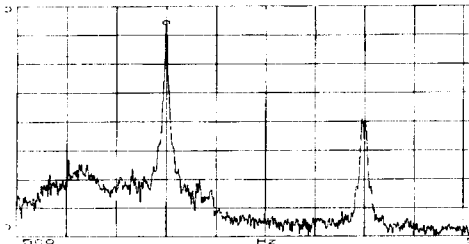


Fig. 6 Sound detection in frequency domain (vertical axis:-80 to 10 under 10dBVrms/div., horizontal axis:0.5 to 5.5 under 0.5kHz/div.)

기준 음원인 2kHz에서 음향 신호가 3.6dBVrms임을 알 수 있다. 그러나 2kHz 음향 신호의 조화 성분(harmonic frequency)인 4kHz가 또한 감지되었음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 끝단이 막힌 중공 원통형 맨드릴을 설계 제작하여 여기에 길이가 150m

인 광섬유를 잡아 하이드로폰을 제작하였다. 제작된 광섬유 하이드로폰을 Mach-Zehnder형 광간섭계와 연동으로 구성하고 신호의 안정성을 얻기 위하여 3x3 방향성 결합기를 사용하였다. 또한 수중 음향신호의 감지성능을 확인하기 위하여 깊이가 10m인 음향수조에서 실험을 하였다. Flexensional 음향신호의 주파수를 2kHz로 하여 하이드로폰의 감지성능을 본 결과 제작된 광섬유 하이드로폰은 음향을 안정적으로 감지함을 확인 하였다. 그러나 실험에서 광섬유 하이드로폰과 간섭계 사이에는 약 100m의 광섬유 케이블(fiber-optic cable; LG OJC-MM-3-ST-ST) 및 광 점프코드가 설치되어 있어 하이드로폰에서 나온 출력 신호가 외부 잡음과 함께 3x3 방향성 결합기에 입력 되어 출력 신호 불안정의 원인이 됨을 확인 하였다. 이것은 차후에 광섬유 케이블의 잡음 신호 차폐 측면에서 심층적으로 연구 되어야 할 것으로 보며 본 연구의 결과는 향후 광섬유 하이드로폰을 이용한 복잡한 배열(array) 설계에 응용이 가능하다고 판단된다.

## 참고문헌

- (1) Dakin, J. P. and Wade, C. A., 1984, "Optical Fibre Hydrophone Array-Recent Progress," SPIE 514, pp. 375-379.
- (2) 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.
- (3) Brown, D. A., Hofler, T., and Garrett, 1989, "High-Sensitivity, Fiber-Optic, Flexural Disk Hydrophone with Reduced Acceleration Response," Fiber and Integrated Optics, Vol. 8, pp. 169-191.
- (4) Bucaro, J. A., Houston, B. H., and Williams, E. G., 1991, "Fiber-Optic Air-Backed Hydrophone Transduction Mechanisms," Journal of Acoustical Society of America, 89(1), pp. 451-453.
- (5) 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.
- (6) Spillman, W. B. and Gravel R. L., 1980, "Moving Fiber-Optic Hydrophone," Optics Letter,

- Vol. 5, No. 1, pp. 30-31.
- (7) Stanton, T. K., Pridham, R. G., McCollough, W. V., and Sanguinetti, M. P., 1979, "On Fiber-Optic Hydrophone Noise-Equivalent Pressure," *Journal of Acoustical Society of America*, 66(6), pp. 1893-1894.
- (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) Bucaro, J. A. Dardy, H. D., 1977, "Fiber-Optic Hydrophone," *Journal of Acoustical Society of America*, 62(5), pp. 1302-1304.
- (11) Koo, K. P., Tveten, A. B., and Dandridge, A., 1982, "Passive Stabilization Scheme for Fiber Optic Interferometers Using (3x3) Fiber Directional Couplers," *Applied Physics Letter*, Vol. 41, No. 7, pp. 616-618.
- (12) McMahan, G. W. and Cielo, P. G., 1979, "Fiber Optic Hydrophone Sensitivity for Different Sensor Configurations," *Applied Optics*, Vol. 18, No. 22, pp. 3720-3722.
- (13) 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.
- (14) Dakin, J. P. and Wade, C. A., and Henning, 1984, "Novel Optical Fibre Hydrophone Array Using a Single Laser Source and Detector," *Electronics Letters*, Vol. 20, No. 1, pp. 53-54.
- (15) 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.
- (16) Danielson, D. A. and Garrett S. L., 1989, "Fiber-Optic Ellipsoidal Flexensional Hydrophones," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 7, No. 12, pp. 1995-2002.
- (17) Henning, M. L. and Hollis, T., 1992, "Fibre Optic Hydrophone System Performance," *Conference Proceedings of the Undersea Defense Technology*, pp. 172-177.
- (18) Hocker, G. B., 1979, "Fiber-Optic Acoustic Sensor with Composite Structure: an Analysis," *Applied Optics*, Vol. 18, No. 21, pp. 3679-3683.
- (19) Hughes, R. and Jarzynski, J., 1980, "Static Pressure Sensitivity Amplification in Interferometric Fiber-Optic Hydrophones," *Applied Optics*, Vol. 19, No. 1, pp. 98-107.
- (20) Lamb, C. and Nash, P. J., 1988, "Practical Optical Fibre Hydrophone Arrays," *Conference Proceedings of the Undersea Defense Technology*, pp. 737-742.
- (21) MaMahon, D. H., Soref, R. A., and Sheppard, L.E., 1984, "Sensitive Fieldable Photoelastic Fiber-Optic Hydrophone," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. LT-2, No. 4, pp. 469-478.
- (22) McMahan, G. W. and Cielo, P. G., 1979, "Fiber Optic Hydrophone Sensitivity for Different Sensor Configurations," *Applied Optics*, Vol. 18, No. 22, pp. 3720-3722.
- (23) Mills, G. B., Garrett, S. L., and Carome, E. F., 1984, "Fiber Optic Gradient Hydrophone," *SPIE Vol. 478*, pp. 98-103.
- (24) 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.
- (25) Nash, P. J., Lamb, C., and Beard, P., 1991, "Optical Hydrophone Array Technology for Beamforming Applications," *Conference Proceedings of the Undersea Defense Technology*, pp. 288-296.
- (26) Vengsarkar, A. M., Murphy, K. A., Tran, T. A., and Claus, R. O., 1988, "Novel Fiber Optic Hydrophone for Ultrasonic Measurements," *1988 Ultrasonics Symposium*, pp. 603-606.