

논문 2000-9-4-04

## 균일한 FBG(Fiber Bragg Grating) Hydrophone의 음향-광변환기 설계 및 제작 김경복, 곽계달

### A Design and manufacture of acoustic-optic converter in the Uniform FBG hydrophone sensor.

Kyung-Bok Kim, Kae-Dal Kwack.

#### 요약

FBG (Fiber Bragg Grating)를 이용한 광섬유 수중 음향센서의 주파수 특성을 개선 하기 위하여, 새롭게 고안 된 음향- 광변환기(acoustic-optic converter)에 진동판과 FBG의 일체형을 개발하므로써, 1.4 KHz대 까지의 주파수와 음파 지향성 검출이 가능 하였다.

#### Abstract

For the improvement of frequency characteristics of FBG(Fiber Bragg Grating) hydrophone sensor, we can detected the frequency ranging to 1.4KHz and acoustic directivity by the development of newly designed diaphragm and united type of FBG.

#### I. 서 론

빛이 진행하는 광섬유의 코어내에 주기적인 굴절을 변화가 새겨진 것으로 잘알려진 광섬유 브래그 격자(Optical Bragg Grating)은 광폭 스펙트럼이 광섬유의 격자소자로 통과될 때, 외부에서 가해진 음압으로 인하여 브래그 조건이 발생되며, 이때 결정된 파장 성분이 광섬유 격자부위에서 반사되며, 나머지 파장성분은 그냥 통과한다. 음향파가 매질을 통해 광섬유 격자소자에 전달될 때, 주기적인 압력의 변화는 그것에 대응되는 매질의 굴절율과 FBG(Fiber Bragg Grating)크기를 변화 시킨다. 비간섭계 구성 방식의 FBG 수중음향센서에서는 이러한 변화가 광섬유 격자소자를 통하여 진행하는 빛의 파장 변화와 빛의 세기변위로 나타난다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 FBG 수중음향센서의 주파수특성을

개선하고, 응답 특성을 향상시키기 위하여 새롭게 고안 된 광변환기를 적용하여 실험한 결과, 수중에서 1.4 kHz 까지 주파수 응답을 얻을 수 있었고, FBG 수중음향 센서의 감도성 향상과 음파의 지향성 탐지도 가능하였다.

#### II. 센서응답과 음압감도.

광섬유 격자센서의 센서 암(arm)에 음압의 유기를 극대화하기 위하여, 기계적인 수단으로서 광섬유 격자 부위에 물리적인 탄성성(elasticity)과 광탄성성(photo-elasticity)을 가함으로써, 브래그 파장조건이 재결성 되어, 브래그 격자 부위에서 가해진 물리량인 음압에 의하여 주기적인 굴절을 변화를 야기 시킨다. 이때, 광학 센서 응답을 산출 하기위하여 표준화된 변조지수(M)은 다음과 같이 정의 된다. 즉, [식 1]과 같이 브래그 파장( $\lambda_B$ )와 음압(P)에 의하여, 변화된 브래그 파장의 변화량( $\Delta\lambda_B$ )의 비로 나타낼 수 있다.

한양대학교 전기·전자공학부 (School of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University)

<접수일자 : 2000년 5월 6일>

$$M = \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B P} \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_B$ 와  $\Delta \lambda_B$  는 그림 1과 같은 브래그 조건 (Bragg condition)에 의해서 결성된 파장성분과 변화량으로써 다음과 같이 표현된다<sup>(2)</sup>.

$$\begin{aligned} \lambda_B &= 2 \eta_{eff} \Lambda_b \quad (2) \\ \Delta \lambda_B &= \lambda_B [(\alpha + \xi) \Delta T + (1 - P_e) \Delta \varepsilon] \quad (3) \\ &= K_T \Delta T + K_\varepsilon \Delta \varepsilon \end{aligned}$$

[식 2]와 [식 3]에서,  $n_{eff}$  는 광섬유격자의 유효 굴절율이고,  $\Lambda_b$ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이고,  $\Delta T, \Delta \varepsilon$ 는 광섬유 격자의 온도 및 스트레인의 변화량이다. 특히, [식 3]에서 브래그 파장의 변화를 정밀하게 측정하면, 광섬유 격자에 가해진 압력, 온도, 스트레인과 같은 외적인 물리량을 표현한 수식으로, 이것이 광섬유 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본원리인 것이다. 여기서,  $P_e$ 는 광탄성 상수이고, 이는 다시 [식 4]와같이 나타낸다.

$$P_e = \left( \frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu (P_{11} - P_{12})] \quad (4)$$

또한,  $\alpha$  는 광섬유의 온도에 따른 열팽창계수이고,  $\xi$  는 온도에 의한 광섬유의 굴절을 변화를 나타내는 열광학 계수로서 실리카(silica)의 경우  $\alpha$ 는  $0.5 \mu\text{m}$ 이고,  $\xi$ 는  $8.3 \mu\text{m}$ 정도의 값을 가지므로 온도에 의한 브래그 파장의 변화는 대부분 굴절을 변화에 기인 한다.  $P_{11}, P_{12}$ 는 스트레인 광학텐서의 성분이고,  $n$ 은 광섬유 코어의 굴절율이며,  $\nu$ 는푸아송 비(Poisson's ratio)이다.

한편, 세기변조 방식의 광섬유 격자소자에 음파가 가해질 때, 음파는 매질을 통해 광섬유 격자소자에 전달되어, 주기적인 압력의 변화는 그것에 대응되는 매질의 굴절율과 크기를 변화 시킨다.비간섭계 센서 구성방식에서는 이러한 변화가 광섬유 격자소자를 통해서 진행하는 빛의 파장변화와 빛의 세기 변위로 나타난다. 이것을 광-음향효과라 하며, 그 변화량의 정도는 매질에 따라 다르나, 통상 광-음향효과는 광섬유 격자소자의

물리적인 길이 변화와 도파 되는 광의 굴절을 변화에 비교할 때, 그 효과는 미미한 것으로 알려져 있다. 따라서, 음파가 인가될 때, 광섬유 격자소자의 물리적인 길이변화와 굴절율의 변화에 대한 관계식으로 나타내어 지고, 음압에 따른 광섬유 격자소자의 파장변화에 대한 최종 결과식은 [식 5]와 같이 얻어 진다.<sup>(3)</sup>

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{BP} &= \lambda_B \left[ - \frac{(1-2\nu)}{E} \right. \\ &\quad \left. + \frac{n^2}{2E} (1-2\nu)(2\rho_{12} + \rho_{11}) \right] \Delta P \quad (5) \end{aligned}$$

한편, 변조지수 (M)은 광섬유 격자센서의 특성을 결정짓는데, 필요한 압력감도(S)와 최소 검출 압력 산출과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이때, 변조지수(M)은 다음과 같이 다시 쓸 수가 있다.<sup>(4)</sup>

$$M = \left( \frac{dT}{dX} \right) \left( \frac{dX}{dP} \right) \quad (6)$$

[식 6]에서 T는 광섬유 전송계수이고, X는 광 변환기의 변위이다. [식 6]은 기계적인 구조에의한 세기변조방식에서 광섬유 격자 센서의 응답특성에 상당한 영향을 주기 때문에 비록 수식은 간단하지만, 매우 중요한 의미를 지니고 있다. 이와같은 간단한 수식은 두가지 파라메타의 변조 지수로 구성되어 있는데 즉, 외부로부터 음압이 유기되었을 때, 광섬유 격자소자의 브래그파장에 새로운 파장 결성 조건을 광학적으로 영향을 주는 광학적인 파라메타  $\left( \frac{dT}{dX} \right)$ 항과 기계적인 장치로 구성된 광변환기의 설계특성에 관계되는 기계적인 파라메타  $\left( \frac{dX}{dP} \right)$ 항이 있다. 여기서, 센서응답에 관계되는 전체 압력감도(S)는 음압이 인가되었을 때, 광섬유 격자소자 브래그 파장의 광학적인 변화량( $\Delta \lambda_{BP}$ )과 변조지수(M)의 곱으로 나타내어 진다.

$$S = \Delta \lambda_{BP} \cdot M \quad (7)$$

여기에 [식 3]와 [식 6]을 대입하여 정리하면 [식 8]을 유도할 수가 있다.

$$S = (K_T \Delta T + K_\varepsilon \Delta \varepsilon) \left( \frac{dT}{dX} \right) \left( \frac{dX}{dP} \right) \quad (8)$$

[식 8]은 다시 변조지수의 항을 광학적인 파라메타와 기계적인 파라메타로 나누어 표시할 수 있는데, 광학적인 파라메타는 결국 음압에 따른 광섬유 격자소자의 광학적인 변화에 대한 결과이므로 [식 5]에 기인 한다. 그리고, 기계적인 파라메타는 음압이 전달되는 진동막(diaphragm)의 물리적인 크기(A)와 음압과 같은 외력을 받았을 때, 물질의 탄성력과 기계적인 결합계수로 나타내는 센서의 기계적 허용성(mechanical compliance :  $C_m$ )에 대한 곱으로 표현될 수 있다. 다시 [식 8]을

[식 5]와 기계적인 파라메타  $\left(\frac{dX}{dP}\right) = A \cdot C_m$  을 대입하여 정리하면, 본 연구에서 설계 및 제작되어 사용된 세기변조 방식의 광섬유 격자소자 센서의 음압감도를 결정짓는 최종함수의 결과식을 유도할 수 있다.

[식 9]

$$S = (K_T \Delta T + K_\epsilon \Delta \epsilon)$$

$$\left( \lambda_B \left[ -\frac{(1-2\nu)}{E} + \frac{n^2}{2E} (1-2\nu)(2\rho_{12} + \rho_{11}) \right] \Delta P \right) (A \cdot C_m) \quad (9)$$

[식 9]의 최종 결과식에서 본 센서의 특성을 다음과 같이 분석할 수 있다. 첫째항은 광섬유 격자의 온도와 스트레인의 변화량( $\Delta T, \Delta \epsilon$ )에 관계되는 함수로 되어 있다. 여기서  $K_T, K_\epsilon$  는 온도와 스트레인에 관계되는 선형계수이다. 비간섭계 방식의 세기 변조 방법의 광섬유 센서 시스템에서는 온도변수가 주는 영향은 극히 미약함으로 무시할 수 있으나, 스트레인 변수는 광섬유 격자의 브래그 격자 조건을 변화 시키는 중요한 요인으로 작용한다. 둘째항은 변조지수에서 광학적인 파라메타에 관계되는 요인으로서 함수에서 나타나고 있는, 각각의 변수들이 광섬유 격자에 영향을 주는 정도의 값이 미미한 것으로 알려져 있어, 음압에 의한 영향력이 거의 무시할 수 있는 항이다. 셋째항은 변조지수에서 기계적인 파라메타에 관계되는 함수로서 외부에서 인가되는 음압에 대하여 광섬유 격자에 새로운 브래그 조건을 결정할 수 있는 항으로, 세기 변조 방식의 광섬유 센서에서 기계적인 설계 방법에 따라, 센서의 응답 특성이 좌우되고, 센서의 음압 감도를 극대화할 수 있는 중요한 항이다. 따라서 셋째항에 관계되는 트랜스듀서의 설계가 본 센서의 특성을 결정짓는 중요한 요인으로 나타남을 알 수 있다.

### III. 광변환기의 설계 및 제작

미지의 수중음파 신호를 최종적인, 전기적 신호로 나타내기 위하여, 우선 수중 음파가 광신호로 최적 검출이 되어야 한다. 이를 실현 하기 위하여 [식 9]에서 나타난 바와 같이, 광학적인 효과보다, 기계적인 요인이 신호의 응답에 커다란 영향을 미친다는 사실을 이론적으로 분석되었다. 따라서 수중음파 신호의 최적 검출방법으로 주파수에 따른 음파 떨림을 기계적인 수단으로 변환하여 FBG에 물리적 광탄성이 최적 전달되도록 광변환기가 고안 설계되어야 한다. [식 9]에서 제3항의 ( $A \cdot C_m$ )에서 A는 음압이 유기되는 진동막의 실질적인 면적이므로 설계된 광변환기에서는 고정적인 값을 지닌다.  $C_m$  값은 다시 [식 10]과 같은 센서의 기계적 허용성 (mechanical compliance)으로 표현할 수가 있다.

$$C_m \approx G \frac{\Lambda_d^3}{Ed^4} \frac{1}{t_d} \quad (10)$$

여기서, 상수 G는 광섬유에 부가가 적용 될때, 또는 적용 안될때 기인하는 상수값이고, E는 영율이며, d는 광섬유 직경,  $t_d$  진동막의 두께이고,  $\Lambda_d$ 는 음압이 진동막에 유기되어 떨림 현상이 일어날때 떨림 진폭이다. [식 10]에서 나타낸대로 G값은 상수값 이고, E값과 d는 그 효과가 미미하고,  $t_d$ 는 통상 수  $\mu m$  크기 이므로 커다란 영향을 주지않는다. 결국  $C_m$  값에 절대적인 영향을 미칠 수 있는 요인은  $\Lambda_d$ 값, 즉 유기된 음압에 의한 진동막의 떨림 진폭에 의하여 광변환기의 특성이 결정됨을 알 수 있다. 따라서, 두께가 균일하고 진동막의 반경에 비하여  $t_d$ 가 절대적으로 적으면, 진동막의 주변이 일정한 장력을 가지고 복처럼, 고정되어 있을 때, 자유 진동의 모드는 무수히 많이 존재한다. 여기서 발생한 진동은 주파수가 서로 복잡한 조화 관계를 형성하므로 진동막의 떨림 진폭이 일정한 형태로 발생되지 않으며, 여러 가지 무조음을 발생시키는 현상으로 나타난다고 알려져 있다.<sup>(5)</sup> 따라서, 고안된 광변조기에서는 유기된 음압에 의하여 진동막의 떨림이 기본 진동임을 고려하여, 기본공진 주파수만을 고려 한다면,  $\Lambda_d$  간의 최대 결정요인은 [식 11]과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\Delta_d \Rightarrow f_{01} = \frac{0.382}{a} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (11)$$

여기서, T는 진동막의 장력(N/m)이고, m은 진동막의 면의 밀도(kg/m<sup>2</sup>)이며, a는 진동막의 반경(m)이다. 따라서, 광섬유 브래그 격자에 외부에서 가해진 음압으로 인하여 최적의 브래그 조건을 발생시키기 위하여, 우선 고려되어야 할점은, FBG와 음파의 진동을 유발하는 진동막이 일체형으로 되어, 매질을 통한 음압이 최적의 공진 조건으로 되어, 광변환기에 음파가 최대한 유기되어야 한다. 이를 실현하기 위하여 새로 고안된 광변환기는 2장의 진동막 사이에 열 접합용 용매제를 첨가하고, FBG를 그사이에 정렬 위치 시킨후, 공기가 주입되지 않도록 heating 하여, FBG와 진동막이 한 물체를 이루고, 몸체가 된 센싱부가 복처럼, 주변 이 균일한 일정 장력으로 고정되도록 설계 하였다. 또한, 광변환기에서 검출된 음파 미세 신호의 응답특성과 검출거리의 증대를 피하기 위하여, FBG 출력단에 광섬유 증폭기를 부착하도록 설계되었다. 이와같이 설계된 일체형 FBG 진동막을 직경10 cm의 광변환기 몸체상단과 최대한 밀착시킨후, OSA(Optical Spectrum Analyser)로 관찰하여, FBG의 중심파장에 적절한 조건의 장력을 준후, 몸체에 고정시킨다. 이렇게하여 새롭게 고안되어, 설계 및 제작된 광변환기는 그 크기가 직경10 cm, 높이 15 cm의 원통형 모양으로 그림 1과 같이 제작되었다.

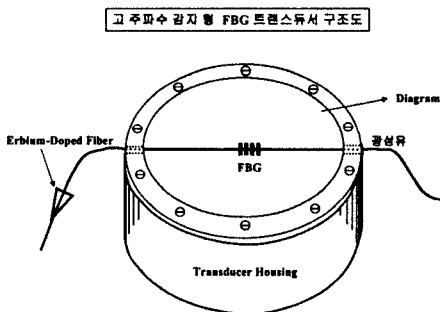


그림 1. 설계된 FBG수중음향 광변환기  
Fig. 1. The designed underwater acoustics-optic converter of the FBG.

IV. 실험시스템 구성 및 실험

설치된 실험 시스템 구축은 세기변조 방식의 FBG

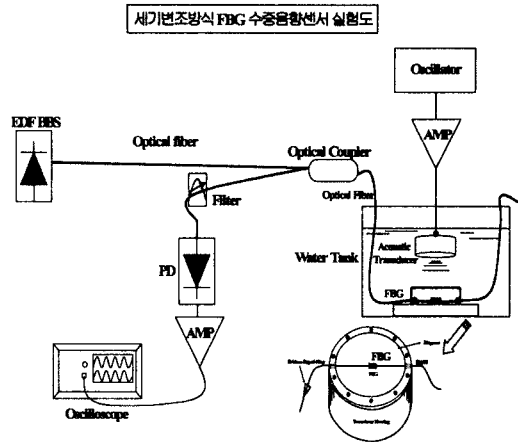


그림 2. 세기변조방식의 FBG 수중음파 검출 시스템  
Fig. 2. The FBG underwater sound wave detection system of the intensity modulation.

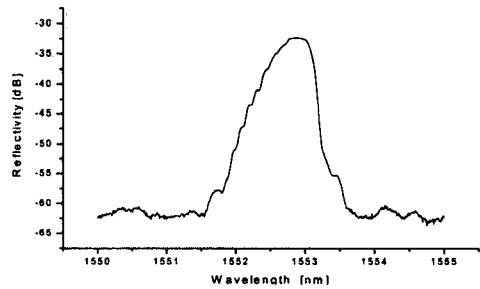


그림 3. 실험에 사용된 FBG 파장특성  
Fig. 3. The character of the FBG wave used in the test.

수중 음파 검출을 위한 구성 시스템으로 그림 2 와 같다.<sup>(6)</sup> 광원은 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier) BBS(Broad Band Source)를 사용 하였고, 검출기는 포토다이오드를 사용하였다. 음파에 의하여 변조된 특정 광신호를 받기 위하여 narrow band filter를 검출기 앞단에 위치 시켰다. 광섬유 격자소자 센싱부는 일체형 FBG 진동막을 이용하여 새롭게 고안 제작된, 광변환기를 통하여 외부에서 인가된주파수를 광섬유 격자소자에 인가했을때, 인가된 베이스 밴드 신호가 FBG 일체형 진동막에 전달되어, 수중 음파를 검출하도록 설계 하였다. 사용된 광섬유는 단일모드 광섬유이고, 광섬유 격자의 중심파장은 그림 3과 같이 1552.8 nm이고, 수중 음원은 방수처리된 스피커(사용 주파수범위 : 1 Hz ~

20 kHz)를 사용 하였으며, 오실레이터를 통하여 싸인파 주파수를 100 Hz - 5 kHz 범위에서 가변하여 인가 하였다. 실험에 사용된 수조는 무향판이 설치안된 유리 수조로서, 그 크기는 가로,세로,높이가 약 2m x 1m x 1.5m이다. FBG 수중음파 광변환기에서 최종검출된 음파 신호는 2x1coupler를 통과한후, 필터를지나, 수광소자와 pre-amp를 걸쳐 오실로스코프로 신호처리 하였다.<sup>(7)</sup> 또한, 기존의 PZT센서는 그 특성상 저주파수 대역에서 취약한 특성을 지니고 있다. 본 실험에서는 FBG 광변환기가 군사용으로 많이 이용되는 저주파수의 영역에서 장점을 지니고 있다는 확인 실험을 위하여, PZT센서(모델:Transducer ITC-6069)와 제작된 FBG 광변환기의 저주파수 대역에서 비교 실험을 실행하였다.

V. 결 론.

실험결과 국내최초로 제작된 FBG 광변환기의 수중 음파에 의한 최적 공진조건은 수중에서주파수 289 Hz대에서 최적 조건이 발생 하였고 그림 4, 그림 5는 제작된 FBG 광변환기의주파수에 따른 응답 특성표이다.

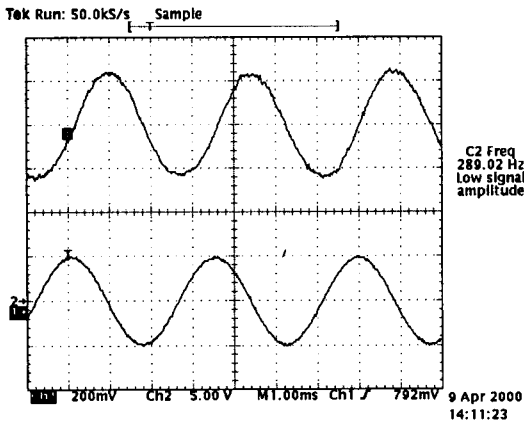
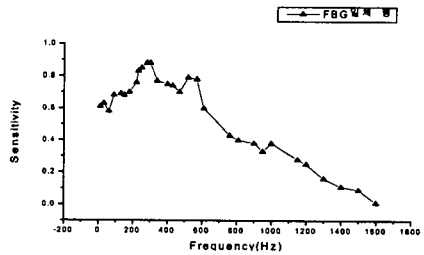


그림 4. 주파수 289 Hz대에서 신호 검출된 수중 음파 응답특성 (윗그림)FBG센서에서 검출된 신호 파형, (아래그림)음원에 인가된 기준신호 파형  
 Fig. 4. The character of the underwater sound wave response detected in 289Hz (Above) The signal wave type detected in the FBG sensor, (Below)The reference wave type permitted to the sound source.



□ FBG일체형 광변환기의 주파수응답 특성 결과표

그림 5. 제작된 FBG 광변환기의 주파수 응답 특성표  
 Fig. 5. The table of the characteristics frequency response of the constructed FBG light convertor.

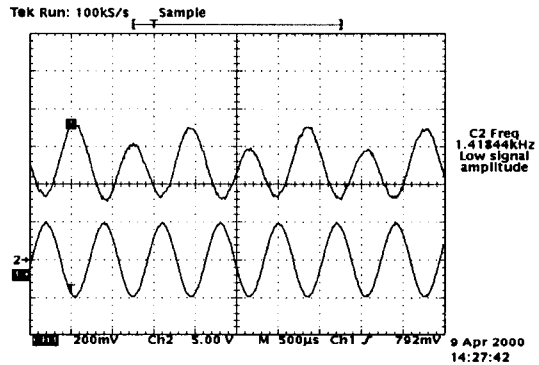


그림 6. 주파수 1.4 kHz대에서 신호 검출된 수중 음향파 응답특성. (윗그림)FBG센서에서 검출된 신호 파형, (아래그림)음원에 인가된 기준 신호파형.  
 Fig. 6. The character of the underwater sounder wave response detected in the 1.4 kHzs. (Above)The signal wave type detected in the FBG sensor, (Below)The reference wave type permitted to the sound source.

광변환기의 최대 검출 가능 주파수 범위는그림 6과 같이1.4 kHz대 까지 검출 가능 하였다. 또한, 주파수 453 Hz대와 주파수 1 kHz대에서 기존의 전기적인 PZT수중 음향 센서와 신호검출 특성을 비교해 볼 때, 저주파수 범위에서 취약한 PZT보다 우수한 특성을 지니고 있음을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 국내에서도 FBG를 이용할 수중음파 검출센서의 실용화 가능성을 열어 놓았고, 본연구의 설계기술의 획득을 통하여 최대 가청주파수 대역인 20 kHz까지 신호 검출가능성을 열어 놓았다.

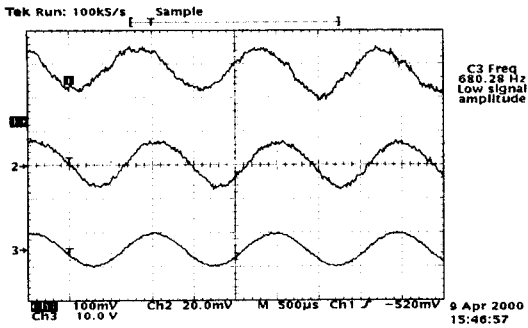


그림 7. 주파수 680 Hz대에서 비교 검출된 수중 음파 응답특성. (윗그림)FBG센서에서 검출된 신호 파형, (중간그림)PZT센서에서 검출된 신호 파형, (아래그림)음원에 인가된 기준신호 파형.

Fig. 7. The character of the underwater sound wave response detected by being compared with the PZT sensor in 680Hzs. (Above)The signal wave type detected in the FBG, (Middle)The signal wave type detected in the PZT sensor, (Below)The reference wave type permitted to the sound source.

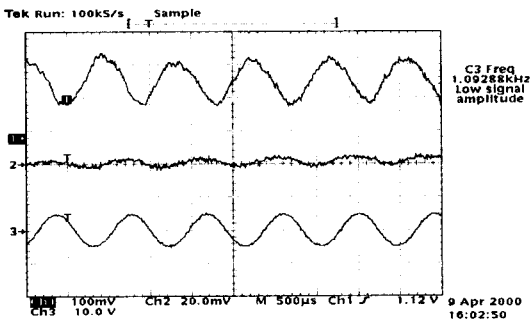


그림 8. 주파수 1 kHz대에서 비교 검출된 수중 음향파 응답특성. (윗그림)FBG센서에서 검출된 신호 파형, (중간그림)PZT센서에서 검출된 신호 파형, (아래그림)음원에 인가된 기준신호 파형

Fig. 8. The character of the underwater sound wave response detected by being compared with the PZT sensor in 1 kHzs. (Above)The signal wave type detected in the FBG sensor, (Middle)The signal wave type detected in the PZT sensor, (Below) The reference wave type permitted to the sound source.

실험에 사용된 PZT센서(모델:Transducer ITC-6069)와 FBG 수중음향센서에서 검출된 응답신호에 대한 주파수 특성 비교 신호 파형이 각각 그림 7, 그림 8과 같다. 아울러 음원의 각도 및 방향에 따라 검출된 신호의 응답 특성이 차별화되어, 비교 검출됨으로써, 설계된 광변환기는 음원의 위치와 각도에 따른 신호의 지향성을 탐지 할 수 있다는 사실이 확인되어, 센서 에레이 시스템 구성을 통한, 다 방향의 각기 다른 주파수 대역을 수중에서 감지할 수 있는 가능성을 지니고 있어, 향후 이 분야의 실용화 기술에 초석을 마련 하였다.

### 감사의 글

본 연구는 1999년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소 과제연구비에 의해서 연구되었음.

### VI. 참고문헌

- [1] Takahashi, Tetsumura, "Fiber Bragg Grating underwater acoustic sensor" OFS-13, SPE Vol. 3746,(1999. April).
- [2] Othonos kalli. Fiber Bragg Grating, Artech House P302-P303(1999).
- [3] M.G.Xu, L.Reekie, Y.T.Chow and J.P Dakin "Optical In Fiber Grating High Pressure Sensor" Electronics Letters 18th February 1993, Vol 29, No 4.
- [4] NICHOLAS LAGAKOS, W.J TROTT, TR. HICKMAH, JAMES H.COLE. " Microbending Fiber-optic Sensor as Extended Hydrophone " IEEE Journal of Quantum Electronics Vol QE-18, NO 10, October 1982, P1633-P1638.
- [5] 차일환 "음향공학개론" 한신문화사 P56-P57.(1980)
- [6] 김경복, 김성순, 광계달, 이상배, 최상삼. "단일모드 FBG를 이용한 저주파수 수중 음향센서" P246-P247. (2000, 2). 한국광학회 창립10주년 기념동계 학술발표회.
- [7] 김경복, 김성순, 정제명, 광계달, 이상배, 최상삼 "주파수 특성 개선을 위한 FBG(Fiber Bragg Grating) 수중음향 센서의 트랜스듀서 설계 및 제작" 제7회 광전자 및 광통신 학술회의(COOC 2000) 논문집, (2000, 5).

---

 著 者 紹 介
 

---



김경복 (金景福)

1955년 9월 11일 출생

1983년 광운대학교 전자공학과(공학사), 1986년 연세대학교 전자공학과(공학석사), 1996-현재 한양대학교 전자공학과(박사과정), 1986년-1992년 LG전선(주)연구소

광시스템실 근무(선임연구원), 1992년-현재 경북대학 전자계산과 부교수



곽계달 (郭桂達)

1950년 2월 13일 출생.

1974년 한양대학교 전자공학과(공학사). 1976년 한양대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1980년 Institute of National Polytechnique de Toulouse, France(공학박사)

1981년-현재 한양대학교 전기.전자공학부 교수.