

FBG(Fiber Bragg Grating)Hydrophone 개발에 관한 연구.

A Study on the develoment of FBG hydrophone.

김경복, 김성순, 정재명, 락제달*, 이상배, 최상삼**.

*한양대학교 전기·전자공학부, **KIST 광기술센터.

Kyung-Bok Kim, Sung-Soon Kim, Jae-Myung Jung, Kae-Dal Kwack.

Department of Electric Engineering, Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

Sang-Bae Lee, Sang-Sam Choi.

Photonics Research Center, KIST, Seoul 130-650, Korea

kbkim@kyungbok.ac.kr

[요약]

국내에서 개발된 광섬유 격자(FBG)를 사용하여 국내 최초로 3종의 FBG 음향 트랜스듀서를 설계 및 제작 하였다. 제작된 FBG 트랜스듀서들에 대하여 특성을 분석하고, 수중에서 각각의 주파수 특성실험을 하였다. 그리고 수중에서 임의의 음파에 대한 다중점 신호 검출과 지향성 실험을 행하였다. 실험결과 주파수 특성은 최대 18 KHz까지 음파 검출이 가능하였고, 시스템에 레이 가능성을 확인할 수 있어, 향후 실용화 연구가능성을 마련 하였다.

[Abstract]

In the using of FBG developed in home land, We designed and manufactured three types of FBG sound transducers the first in Korea. Analysizing special characters on FBG transducers manufactured, we made an experiment on respective frequency peculiarities in the water and we made an experiment on multi-point signal detection and direction about optional acoustic underwater. As the experimental result, we made it possible acoustic detection on frequency peculiarities to maximum 18KHz and made certain the system array possibilities, from now on we prepared the practical use study possibilities.

I. 서론

광섬유 브래그 격자(Optical Bragg Grating)는 광폭 스펙트럼이(broadband spectrum) 광섬유의 격자소자로 통과될 때, 외부에서 가해진 음압으로 인하여 브래그 조건(Bragg condition)이 발생되며, 이때 결정된 파장 성분이 광섬유 격자부위에서 반사되고, 나머지 파장성분은 그냥 통과한다. 음파가 매질을 통해 광섬유 격자소자에 전달될 때, 주기적인 압력의 변화는 그것에 대응되는 매질의 굴절율과 FBG(Fiber Bragg Grating) dimension을 변화시킨다. non-interferometric구성 방식의 FBG hydrophone 에서는 이러한 변화가 광섬유 격자소자를 통해서 진행되는 빛의 파장변화와 빛의 세기변위로 나타난다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 3종의 FBG 트랜스듀서를 설계 및 제작하여 주파수 특성을 실험하고, 수중에서 FBG

hydrophone 의 arrays구성을 위한 전단계의 실험으로 임의의 음파를 다중점에서 검출하고, 지향성 특성을 위한 시스템을 구성하여 국내 최초로 제작된 FBG 트랜스듀서들의 특성을 분석 하였다.

II. 수중음파 검출원리.

광섬유의 코어내에 주기적인 굴절율변화를 생성한 광섬유 브래그 격자는 빛이 광섬유의 격자소자로 통과될 때, 외부에서 가해진 음압으로 인하여[수식1]과 같은 브래그 조건이 나타난다.

$$\lambda_B = 2 \eta_{eff} \Lambda_b \text{-----(1)}$$

여기서, η_{eff} 는 광섬유 격자의 유효굴절율(Effective refractive index)이고, Λ_b 는광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(Grating period)이다. 격자에서 반사되는 브래그

파장(Bragg wavelength)은 유효굴절율과 격자간격의 함수이며, 광섬유 격자에 음파로 인한 스트레인 및 스트레스(strain - stress)등이 가해질때, 이들값이 변화 하여 브래그 파장 조건이 변화하고, 파장이 달라 진다. 브래그 파장의 변화를 정밀하게 측정한다면, 광섬유격자에 가해진 음압, 압력, 온도, 스트레인등과 같은 가해진 물리량을 측정할 수 있으며, 이것이 광섬유 격자를 센서로 사용될 수 있는 기본원리 이다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon] = K_T\Delta T + K_e\Delta\epsilon \quad (2)$$

여기서, $P_e = \left(\frac{n^2}{2}\right)[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{22})]$ 이고,

α 는 광섬유의 온도 영향에 따른 열팽창계수(Thermal expansion coefficient)이고, ξ 는온도에 의한 광섬유의 굴절율변화를 나타내는 열광학 계수 (Thermo-optic coefficient)이다. P_e 는 광탄성 상수(Photo-elastic constant)이고, P_{11} 과 P_{12} 는 스트레인광학텐서(Strain-optic tensor)의 성분이고, n 은광섬유코아의 굴절율이며, ν 는 Poisson's ratio 이다, ΔT ,와 $\Delta\epsilon$,는 광섬유로 측정 가능한 범위내에서는선형적이다. 한편, ΔP 음압변화에 따른, 센서의 파장 쉬프트 $\Delta\lambda_{BP}$ 관계를 살펴보면 non-interferometric 센서 구성방식에서는 이러한 변화가 광섬유 격자소자를 통해서 진행되는 빛의 파장 변화와 빛의 세기 변위로 나타난다.

음향파가 인가될 때, 광섬유 격자소자의 물리적인 길이 변화와 굴절율의 변화관계를 고려하고, 광섬유코아에 새겨진 격자의 간격 변화관계를 정리하여, 음압에 따른 격자소자의 파장변화에 대한 최종 결과식은 다음과 같이 얻어진다.⁽²⁾

$$\Delta\lambda_{BP} = \lambda_B \left[-\frac{(1-2\nu)}{E} + \frac{n^2}{2E}(1-2\nu) \right] \Delta P \quad (3)$$

III. 트랜스듀서의 설계 및 제작.

세기변조방식의 광섬유 음향센서는 광섬유격자인 센서압(Arm)에 음압의 유기를 최적화하기 위하여, 기계적인 수단으로서 광섬유 격자 부위에 물리적인 탄성성(elasticity)과 광학적인 탄성성(photoelasticity)을 가함으로써, 브래그 파장조건이 재결성 되어, 브래그 격자 부위에서 가해진 물리량인 음압에 의한 주기적인 굴절을 변화를 야기 시킨다. 여기서 광학 센서 응답을 산출 하기 위하여 표준화된 변조지수(M)은 다음과 같이 정의 된다. 즉, 브래그 파장(λ_B)와 음압(P)에 의하여, 변화된 브래그 파장의 변화량($\Delta\lambda_B$)의 비로 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B P} \quad (5)$$

변조지수 (M)은 광섬유 격자센서의 특성을 결정짓는데, 필요한 압력감도(pressure sensitivity :S)와 최소 검출 압력 산출과 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 변조지수(M)은 다음과 같이 다시 쓸 수 가 있다.⁽³⁾

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

T는 광섬유 전송계수이고, X는 광 변환기의 변위이다. [수식6]은 세기변조 방식에서 광섬유 격자센서의 응답 특성에 상당한 영향을 주기 때문에 비록 수식은 간단하지만, 매우 중요한 의미를 지니고 있다. 음압이 유기되었을 때, 첫째항은 광섬유 격자소자의 브래그 파장에 새로운 파장 결성 조건을 광학적으로 영향을 주는 광학적인 파라메타 항이고, 둘째항은 기계적인 장치로 구성된 트랜스듀서의 설계 특성에 관계되는 기계적인 파라메타항이 있다. 여기서, 센서응답에 관계되는 전체 압력감도(S)는 음압이 센서압에 인가되었을 때, 광섬유 격자소자인 브래그 파장의 광학적인 변화량($\Delta\lambda_{BP}$)과 변조지수(M)의 곱으로 나타내에 진다

$$S = (K_T\Delta T + K_e\Delta\epsilon) \left(\frac{dT}{dX}\right) \left(\frac{dX}{dP}\right) \quad (7)$$

[수식7]에서 광학적인 파라메타는 결국 음압에 따른 광섬유 격자소자의 광학적인 변화에 대한 결과이고, 기계적인 파라메타는 음압이 전달되는 진동판(diaphragm)의 물리적인 크기(A)와 음압과 같은 외력을 받았을 때, 물질의 탄성력과 기계적인 결합계수로 나타나는 센서의 기계적 허용성(mechanical compliance : C_m)에 대한 곱으로 표현될 수 있다. [수식8]는 본 연구에서 설계 및 제작되어 사용된 세기변조 방식의 FBG 트랜스듀서의 음압 감도를 결정짓는 최종 함수의 결과식이다.

$$S = (K_T\Delta T + K_e\Delta\epsilon) \left[\lambda_B \left(-\frac{(1-2\nu)}{E} + \frac{n^2}{2E}(1-2\nu) \right) \right] (A \cdot C_m) \quad (8)$$

[수식8]에서 첫째항은 광섬유 격자의 온도와 스트레인의 변화량($\Delta T, \Delta\epsilon$)에 관계되는 함수 이고,

K_T, K_e 선형계수이고, non-interferometric 방식의 광섬유 센서 시스템에서는 온도변수가 주는 영향은 극히 미약하므로 무시할 수 있으나, 스트레인 변수는 브래그 격자 조건을 변화 시키는 중요한 요인으로 작용한다. 둘째항은 광학적인 파라메타에 관계되는 요인으로 광섬유 격자에 영향을 주는 정도의 값이 미미한 것으로 알려져

있다. 셋째항은 변조지수에서 기계적인 파라메타에 관계되는 함수로서 외부에서 인가되는 음압에 대하여 광섬유 격자에 새로운 브래그 조건을 결성할 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 본 센서의 특성을 결정짓는 중요한 요인으로 나타남을 알 수 있다. [수식8]에서 나타난 바와같이, 광학적인 요인보다, 기계적인 요인이 신호의 응답에 커다란 영향을 미친다는 사실을 이론적으로 분석되었다. 따라서 수중음향파 신호의 최적 검출 방법으로 주파수에 따른 음향파 펄스를 기계적인 수단으로 변환하여 FBG에 물리적 광탄성이 최적 전달 되도록 트랜스듀서가 고안 설계되어야 한다. [그림1]에는 이와같은 설계 특성에 입각하여 제작된 트랜스듀서들의 모양들이 있다. 즉 진동판과 FBG가 분리된 상태로 몸체에 부착된 형태와 FBG가 진동판과 한몸으로 부착된 일체형 그리고 FBG가 진동판과 한몸으로 부착된 일체형에 음파를 포집할 수 있는 포집부와 몸체에 공기를 넣어 진동판 밖은 물과 경계면을 이루고, 안쪽은 채워진 공기와 경계면을 이루도록 설계 하였다.

IV. 시스템구축 및 실험.

1). 트랜스듀서의 주파수 특성실험.

실험 시스템 구축은 세기변조 방식의 FBG 수중 음파 검출을 위한 구성시스템으로 [그림1]과 같다. 광원은 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier) BBS(Broad Band Source)를 사용하였고, 검출기는 포토다이오드를 사용하였다. 제작된 3종류의 트랜스듀서에 음원의 주파수를 가변하여 광섬유 격자소자에 인가될 때, 인가된 베이스 밴드 신호가 FBG에 전달되어, 수중 음파를 검출하도록 설치 하였다. 사용된 광섬유는 단일모드 광섬유이고, FBG 중심 파장은 각각 1548.7nm, 1552.8nm, 1559.3nm이고, 수중 음원은 방수처리된 스피커(사용 주파수범위: 1Hz~20KHz)를 사용 하였으며, Oscillator를 통하여 싸인파 주파수를 10 Hz~20 KHz범위에서 가변하여 인가 하였다. 실험에 사용된 수조는 무향판이 설치 안된 유리 수조로서, 그 크기는 가로,세로,높이가 약 2m × 1m × 1.5m이다. FBG 트랜스듀서에서 최종 검출된 음파 신호는 2×1 Coupler를 통과한후, 광학필터를 지나, 수광소자와 Pre-Amp를 걸쳐 Oscilloscope로 신호처리 하였다. (4)

2). 다중점 검출 실험.

제작된 FBG 트랜스듀서 특성을 이용하여, 광범위한 영역에 걸쳐 다점 측정이 가능하도록, 시도하기 위한 선행 연구로써, 먼저 2개의 FBG 트랜스듀서를 수조에 넣고, 세기변조 방식의 FBG hydrophone sensor 시스템으로

구성 하였다. 실험에 사용된 2개의 FBG 트랜스듀서는 동일한 주파수특성을 지닌, FBG 일체형으로, 형태는 같다, 중심파장이 각각 1553nm(FBG₁)와 1556.7nm(FBG₂)이다. array system 형태는 한가닥의 주신호 전송 광섬유에 길게 늘어뜨린 끈형으로 구성한, serial system 방법을 도입하여, FBG₁ 트랜스듀서와 FBG₂ 트랜스듀서를 부착 하였다. 검출된 신호의 demodulation techniques은 설계된 트랜스듀서의 검출 가능한 주파수 특성을 고려하여, passive band-pass filter 시스템 방법으로 구성하였다. 광원은 BBS를 사용 하였고, 광검출기는 2개의 포토다이오드를 사용하였다. 음원과 수조는 주파수 특성실험과 동일한 것이며, oscillator를 통하여 싸인파 주파수를 30 Hz~5 KHz범위에서 가변하여 인가 하였다. 2개의 FBG 수중음파 트랜스듀서에서 최종 검출된 음파 신호는 2×1 coupler를 통과한 후, passive demodulation부와 pre-amp를 걸쳐 oscilloscope로 신호처리 하였다.

3). 지향특성 실험.

설계된 FBG 트랜스듀서의 지향성에 대한 특성을 실험하기 위하여, 한 개의 FBG 트랜스듀서에 회전 각도에 따른 가변이 가능하도록, 회전축을 부착하고, 음원의 주파수는 1.2 KHz로 고정된 상태에서 스피커를 통한 음파를 발생 시켜 주었다. 음원과 FBG 트랜스듀서의 간격은 1m의 거리를 두었다. 회전축에 의한 회전각도는 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180° 간격을 두고, 반복 측정 하였다. 이때, 사용된 FBG 트랜스듀서의 중심파장 특성은 약 1552.8 nm이다. 실험에 사용된 FBG 트랜스듀서는 음원의 방향각도에 따른 트랜스듀서 검출 신호의 세기가 지향성을 가지는 결과 특성을 얻었다.

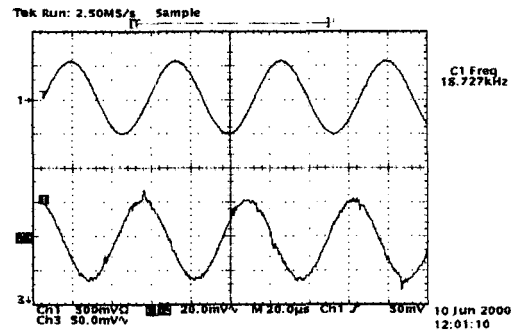
V. 결과고찰.

제작된 3종류 FBG 트랜스듀서의 주파수특성 실험결과 FBG 분리형 트랜스듀서 경우 최대 검출 가능한 주파수는 250 Hz이고 최적 공진 주파수는 90 Hz대에서 검출되었다. FBG 일체형 트랜스듀서에서는 최대 검출 가능한 주파수는 1.4 KHz이고 최적 공진 주파수는 290 Hz대에서 검출되었다. 공기주입 FBG 일체형 트랜스듀서에서는 최대 검출 가능한 주파수는 18.7 KHz이고 [그림2] 최적 공진 주파수는 12~15 KHz대에서 검출되었다. 만약 음원의 주파수가 20 KHz 이상에서 동작된다면, 충분히 높은 주파수 범위에서도 검출 가능함을 예측할 수 있었다. [그림4]은 3개의 FBG 트랜스듀서의 주파수특성에 대한 감도성 비교표 이다. 또한, 다중점 신호검출 실험결과 설계된 FBG₁ 일체형 트랜스듀서와 FBG₂ 일체형 트랜스듀서를 통하여, 수중 음파 주파수 30 Hz대부터 1.4 KHz대 까지 파장분할 방법을 사용하여, 신호의 다중점 검출이 가능 하였다. [그림3]

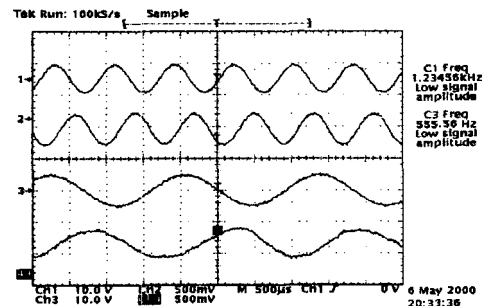
따라서, FBG 트랜스듀서의 수를 늘리면, 광범위한 영역에 걸쳐, 검출 대상에 대한 동일 주파수 신호의 센싱점(sensing point)을 확대 할 수 있고, 신호 특성이 다른 주파수대의 음파를 동시 다발적으로 검출 가능함을 제시 하였다. 아울러, 공기주입 FBG 트랜스듀서를 사용하면, 수중 에서 주파수 18 KHz대까지 범위에서 FBG hydrophone array system 구성이 가능 하고, 음원의 각도 및 방향에 따라 검출된 신호의 응답특성이 차별화 되어, 비교 검출됨으로써, 설계된 트랜스듀서는 음원의 위치와 각도에 따른 신호의 지향성을 탐지 할 수 있다.[그림5]

VI.참고문헌.

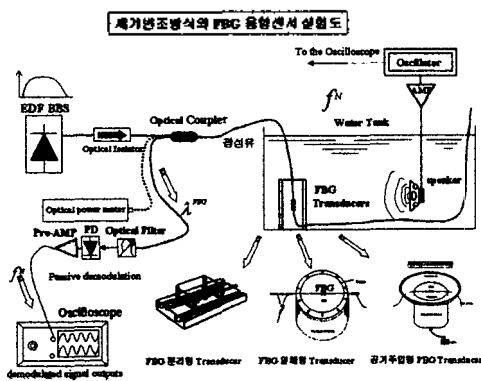
- (1). Takahashi, Tetsumura, "Fiber Bragg Grating underwater acoustic sensor" OFS-13, SPIE Vol. 3746,(1999. April).
- (2). Othonos kalli. Fiber Bragg Grating, Artech House P302-P303 (1999).
- (3). NICHOLAS LAGAKOS, W.J TROTT, TR. HICKMAN, JAMES H.COLE. " Microbending Fiber-optic Sensor as Extended Hydrophone " IEEE Journal of Quantum Electronics Vol QE-18, NO 10, October 1982, P1633-1982.
- (4).김경복,김성순, 정제명, 곽계달, 이상배, 최상삼 제7회 광전자 및 광통신 학술회의(COOC 2000) 논문집, (2000, 5). "주파수 특성 개선을 위한 FBG(Fiber Bragg Grating)수중음향 센서의 트랜스듀서 설계 및 제작"



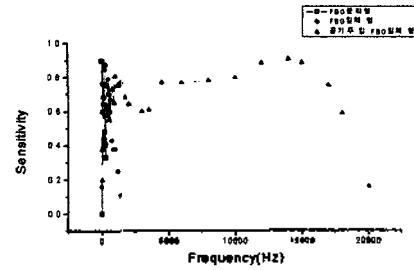
[그림2] 주파수18KHz에서 검출된파형(채널2: FBG센서)



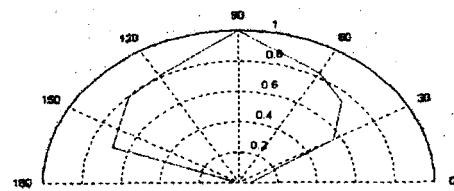
[그림3]주파수1.2KHz와 555Hz에서검출된 다중점신호 파형모양(채널2와4: FBG1과FBG2 트랜스듀서)



[그림1] 3개의 FBG트랜스듀서와 주파수특성실험도



[그림4] 3종류 트랜스듀서에 대한 주파수특성비교



[그림5] 음원의 각도에대한 트랜스듀서응답특성