

논문 2000-9-4-07

FBG(Fiber Bragg Grating) Hydrophone에서 Passive Band-Pass Filter를 사용한 다중점 신호 검출에 관한 연구

김경복, 곽계달

**A study on the multi-point signal detection,
using Passive band-pass filter in FBG Hydrophone**
Kyung-bok Kim, Kea-Dal Kwack

요약

FBG (Fiber Bragg Grating) hydrophone sensor의 arrays system을 구축하고, 수중에서 넓은 영역에 대한 다중점 신호 검출을 구현하기 위하여, WDM(Wavelength Division Multiplexing) 방법과 passive band-pass filter system을 이용하여, 설계 및 제작된 2개의 FBG transducers의 수중 음향파 신호 검출을 실행 하였다. 실험 결과 수중에서 주파수 1.3 KHz대까지 다중점에 대하여, 주파수 신호가 각각 다른신호의 검출이 가능하였다. 따라서, 제작된 FBG transducers을 이용한 hydrophone sensor arrays의 시스템 설계가 가능함을 확인 하였다.

Abstract

To set up the arrays system of FBG(Fiber Bragg Grating) Hydrophone sensor and realize the multi-point signal detection for the wide scope underwater, using WDM(Wavelength Division Multiplexing) method and Passive band-pass filter system, underwater acoustic signal detection of the newly designed two FBG Transducers is successfully experimented. As a result of the experiment, it was possible each signal with different frequent signals is detected for the multi-point up to 1.3KHz in underwater. We can , therefore, prove the possibility on the system design of Hydrophone sensor arrays, using the newly made FBG Transducers.

I. 서 론

광을 이용한 음파 검출 센서는 1976년 Shajenko가 음파에 따라 가변되는 가변거울 어레이를 사용하여 광을 이용한 음향센서를 처음 발표한 이후⁽¹⁾, 오늘날 까지 광섬유를 이용한 광학적 원리에 바탕을 둔, 수중음향 센서로 꾸준히 연구되어 왔다.

한양대학교 전기·전자공학부 (School of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University)
<접수일자 : 2000년 6월 2일>

그 구성 방식에 있어서는 interferometric 방식과 non-interferometric 방식으로 양립되어, 꾸준히 발전되어 왔으나, 이들 모두 센서 앰(sensor arm)의 구성이 다양하고, 복잡하여, 실용화에 어려움으로 지적이 되어 왔다. 더욱이, 수중음향 센서는 point 센서로 사용되기 보다는 신호의 효율성과 광범위한 영역의 신호 검출을 위하여 여러 개의 point 센서를 어레이 방식으로 구축하여 사용되고 있다. 이런 점에서 기존의 광섬유 센서는 센서 앰의 복잡성과 광파워의 손실이 많아 실용 어

레이 시스템 구축에 제한적 일 수 밖에 없었다.

본 연구에서는 최근 KIST에서 개발된 광섬유 격자(FBG : Fiber Bragg Grating)를 이용하여 설계된 2개의 하이드로폰(hydrophone)을 직렬 견인형으로 시스템 구성하고, 주파수가 각각 다른 수중 음파를 발생시켜, 중심 파장이 다른 2개의 FBG 트랜스듀서에서 각각 검출한 후, 신호 수신단에서 주파수가 다른 검출 신호에 대하여, passive band-pass filter 시스템을 사용하여 검출신호의 demodulation을 구현 하므로서, 향후 FBG hydrophone의 시스템 어레이화에 대한 토대를 마련하였다. 설계된 FBG hydrophone에서는 각각 다른 음파의 검출 가능한 주파수 범위는 30 Hz대에서 1.3 KHz 대까지 검출 가능하였다.

II. 광섬유 하이드로폰 어레이.

최근에는 광신호 또는 광섬유를 이용하여 각종 물리량과 화학적 반응을 검출하는 센서들(온도, 압력, 음향, 회전량, 가속도, level, 유량, 전류 및 전압, PH량, on-off신호, strain등)의 개발이 활발히 진행되면서, 이들 센서들의 실용화에 커다란 어려움 중의 하나가 시스템의 어레이를 꼽을 수 있다. 물론 경우에 따라서 특정 대상이 point sensing에 국한되어 센서 시스템이 구축되는 경우도 있으나, 신호 검출의 고감도성, 신호대 잡음비의 개선, 측정 대상 영역의 확대와 다른 광통신 시스템과의 연계성, 지향성을 고려하여 광섬유센서 시스템의 어레이 추세에 있다. 더욱이 수중 음파를 검출하는 fiber-optic hydrophone센서에서는 시스템의 어레이화가 필연적이다.

1). 어레이 모양.

어레이 모양에 있어서 기존의 트랜스듀서(piezoelectricity, magnetostriction)는 그 모양이 plane 또는 cylindrical 어레이 형태가 주류를 이루고 있으나, 광학적 원리에 바탕을 둔 광섬유 하이드로폰 어레이 형태는 뱃줄을 길게 늘어뜨린 형태로 하여, 선박에 끌고 다닐 수 있도록 설계된다. 기존 시스템 형태의 경우, 통상 항해시 선박의 뱃머리에 항상 고정하여 설치한다. 따라서 시스템이 동작하든, 동작 하지 않든, 지정된 위치에 부착되어져야 하는 단점과 그 부피가 대단히 크다는 점이다. 광섬유 하이드로폰 형태는 시스템 설치에 유연성이 있어 뱃줄처럼 감아서 보관하다가 시스템

동작이 필요시 물속으로 늘어뜨려 사용할 수 있으며, 시스템 설치 위치에 대한 가변성이 가능하다는 점이다. [그림1]은 광섬유 하이드로폰을 선박에 끈형 형태로 구축한 하이드로폰 어레이 모양의 그림이다.

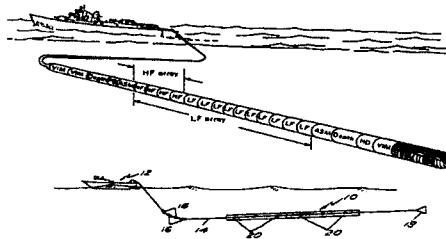


그림 1. 선박에 설치된 끈형태 모양(Towed-line Array)의 Array Style.

Fig. 1. The towed-line array style setted up on the ship

2). 어레이 이득.

하이드로폰 어레이를 구축함으로서 얻을 수 있는 최대 장점은 신호검출에 대한 높은 감도성인 것이다. 동일 음파에 대하여 하나의 트랜스듀서에서 발생되는 전류나 전압보다, 여러개의 트랜스듀서를 통하여(plane array, cylindrical array, towed-line array 모양) 그 수량에 비례하는 더 많은 전류나, 전압을 발생시켜, 신호 검출성을 높일 뿐만 아니라, 신호대 잡음비를 개선시켜 음원의 위치와 방향을 정확히 식별 한다는 점이다. 따라서, 지향성 지수나 신호대 잡음비 경우 구성된 트랜스듀서의 어레이 이득을 통하여 얻을 수 있다. array gain(AG)는 통상 어레이의 한개에 대한 종단에서의 전체 어레이에 대한 신호대 잡음비이다.

$$\frac{S^2}{N^2} = \frac{[S_1(t) + S_2(t) + \dots + S_n(t)]^2}{[n_1(t) + n_2(t) + \dots + n_n(t)]^2} \quad (1)$$

여기서, $S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)$,은 위상지연과 시간지연이 포함된 시간에 관계된 함수이고, 각각의 트랜스듀서의 신호에 대한 출력 전압의 함수이며, $n_1(t), n_2(t), \dots, n_n(t)$ 은 각각의 트랜스듀서에서 나오는 잡음출력이고, m 은 비례상수이다. 따라서, 평균 신호대 잡음비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

또한, $\overline{S_1^2} = \overline{S_2^2} = \dots = \overline{S_n^2} = \overline{S^2}$ 이며,

$$\frac{1}{n_1^2} = \frac{1}{n_2^2} \cdot \dots \cdot \frac{1}{n_n^2} = \frac{1}{n^2} \text{이므로, [식1]에서 전개}$$

하고 이를 정리하면, 한 개의 트랜스듀서에 대하여 어레이의 신호대 잡음비로서, 다음 [식2]로 어레이 이득이 최종 정리 된다.

$$AG = 10 \log \frac{\overline{S^2 / N^2}}{\overline{s^2 / n^2}} = 10 \log \frac{\sum_i \sum_j (\rho_s)_{ij}}{\sum_i \sum_j (\rho_n)_{ij}} [\text{dB}] \quad (2)$$

여기서, $(\rho_s)_{ij}$ 와 $(\rho_n)_{ij}$ 는 신호와 잡음에 대한 i,j 번째 Crosscorrelation Coefficients이다.

한편, 광섬유 하이드로폰에 있어서 트랜스듀서의 신호 대 잡음비를 구하여, 어레이 이득을 유도해 보기로 한다. 광섬유의 길이가 ℓ 이고, 감쇄계수(attenuation coefficient)가 α 인 광섬유를 통과한 후, 검출단의 광검출기에 입사되는 광파워를 $W_0 10^{-\alpha \ell}$ 이라고 하자.

여기에서 T 는 트랜스듀서의 전송계수이고, W_0 는 광섬유에 입사되는 광원의 입력파워이다. 음파 P 가 인가되어 트랜스듀서에서 전송신호를 변화 시켰을 때, 전송 계수는 $T + \Delta T$ 로 변화되어, 이때, 검출된 신호는 $\Delta T W_0 10^{-\alpha \ell}$ 로 된다.⁽²⁾ 이때 검출기에 흐르는 신호 전류는 다음과 같다.

$$I_s = (\eta e W_0 / \hbar \nu) 10^{-\alpha \ell} \Delta T \quad (3)$$

여기서, η 은 검출기의 양자효율, e 는 전하량이고, \hbar 는 Planck's Constant, ν 는 레이저 주파수, ℓ 은 센서의 구성에 사용된 광섬유의 총 길이이다. 또한, ΔT 는 FBG hydrophone의 경우 음압이 세기변조방식의 광섬유 격자소자 센서에 외부 압력으로 가해졌을 때, 격자에서 반사되는 브래그 파장(Bragg wavelength: λ_B)은 유 효 굴절율과 격자간격의 함수이며, 광섬유 격자에 음향파로 인한 스트레인이 작용하여, 이들 값이 변화 하여 브래그 파장조건이 달라 진다. 이것이 곧 트랜스듀서의 광학적인 전송계수인 것이다. ΔP 즉, 음압변화에 따른, 센서의 파장 쉬프트 $\Delta \lambda_{BP}$ 는 다음수식과 같이 주어진다.⁽³⁾

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{\Delta \lambda_{BP}}{\lambda_B} \cdot A = \frac{\Delta(n\Lambda)}{n\Lambda} \cdot A \\ &= \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial P} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial P} \right) \cdot A \Delta P \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 A 는 음향파가 유기되는 트랜스튜서의 diaphragm 면적이고, n 은 광섬유의 굴절율이며, Λ 는 광섬유 코아에 새겨진 격자의 간격이다. 그리고 광검출기의 평균한 신호대 잡음에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\overline{I_N^2} = 2e(\eta e / \hbar \nu)(W_0 T e^{-\alpha \ell}) \Delta f \quad (5)$$

여기에서 Δf 는 검출기의 대역폭이다. 따라서, FBG hydrophone에 있어서 트랜스듀서의 신호대 잡음비 (SNR_{FBG})는 [식3]과 [식5]를 정리하면 [식6]과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 최종 정리하면 FBG hydrophone의 어레이 이득(AG)을 구할 수 있다.

$$SNR_{FBG} = \frac{I_s^2}{\overline{I_N^2}} = \left(\frac{4 T \hbar \nu \Delta f}{\eta W_0 10^{-\alpha \ell}} \right)^{1/2} \left(A \frac{\Delta \lambda_{BP}}{\lambda_B} \right)^2 \cdot P^2 \quad (6)$$

$$AG = 10 \log \frac{(SNR_{FBG})_{array}}{(SNR_{FBG})_{one array}} [\text{dB}] \quad (7)$$

[식6]에서 $SNR_{FBG} = 1$ 일 때, 세기변조방식에 대한 FBG hydrophone의 최소검출압력의 변화 P_{min} 을 [식 8]과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{min} = \left(\frac{4 T \hbar \nu \Delta f}{\eta W_0 10^{-\alpha \ell}} \right)^{1/2} \left(A \frac{\Delta \lambda_{BP}}{\lambda_B} \right)^{-1} \quad (8)$$

[식8]을 살펴보면, 앞의 항은 광학적인 파라메터 항으로 값의 변화가 크지 않는 반면, 음파가 유기되는 트랜스듀서의 diaphragm 면적 A 와 광섬유 격자의 브래그 파장의 변화량이 FBG hydrophone의 최소검출압력의 변화량을 결정짓고 있음을 알 수 있다.

3). 다중화 기술.

위험한 지역, 열악한 환경등에서 정보를 분산 검출할 수 있는 일은, 센서 시스템에서 매우 중요한 것으로 인식되어 왔다. 이와 같은 다중화 기술에 대하여 광섬유 센서 시스템에서는 시간적, 공간적, 파장 및 주파수,

Coherence domain multiplexing 등의 기술이 적용되어 왔다.

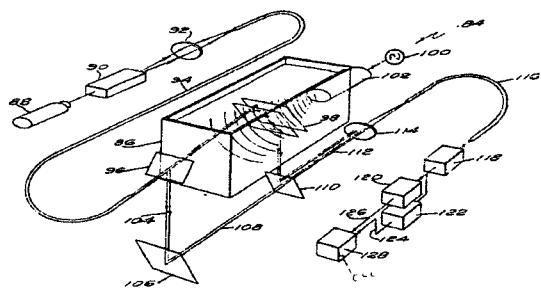
그 중에서도 광신호의 장점을 최대로 이용하여 다양한 시스템 구성방법을 활용한 파장 분할방식 (WDM: Wavelength Division Multiplexing)이 꾸준히 연구되어 왔다.

광섬유 센서 시스템은 기존의 전기나, 기계적인 센서 시스템에 비하여 하나의 광원과, 신호처리 시스템을 사용하여, 신호검출 부분인 센싱부를 직렬 또는 병렬 형태로 광범위하게 분산시켜, 센싱 부분에 전원공급 없이도, 광섬유를 매개체로 정보를 모을 수 있다는 경제적 장점을 지니고 있다. 이를 기술에 있어서도 센서암의 총 길이 연장에 따른 신호지연으로 정보 전송속도, 접속점의 증대에 따른 광파워 손실, 센서암의 광섬유 길이 증대로 인한 신호대 잡음비의 증대, 파장 대역폭등이 고려 되어야 하고, 센서의 수를 10개 이상 분산 및 설치할 경우, 검출 신호에 대한 다중화 기술처리에 제한적일 수 밖에 없었다.

한편, 광섬유 격자(FBG)를 이용한 광섬유 센서 시스템에서는 time and wavelength division multiplexing과 같은, 다양한 방법의 spatial domain multiplexing 기술을 사용함으로서 분산시킬 수 있는 센서의 수를 크게 증대시킬 수 가있다.

4). Sensor Packaging.

광섬유 하이드로폰 어레이를 구성하는데 있어서 또 하나의 어려움이 field적용에 대한 문제성이다. [그림 2]와 같이, 초기 bulk optic interferometer방법으로 구성된 hydrophone 경우, 커다란 He-Ne 개스 레이저와 bulk optical components, beam splitters 등의 사용으로 인하여, 각 소자간의 광학적인 정열에 대한 어려움과 광 출력의 결합 손실이 발생하고, 광학소자와 경로간에 존재하는 공기층에서의 음파와 잡음발생과 수중에서의 높은 압력과 기계적인 충격 및 스트레스에 제한적인 조건이 부여되어서 field적용에 부합되지 못하였다. 이와같은 부분적인 문제점 개선과 신호대 잡음비 향상을 위하여 광원은 반도체 레이저를 사용하고, 광경로에 사용되는 모든 광학적 구성 요소를 광섬유로 대체하는 “All Fiber-Optic Hydrophone” 방법으로 최근까지 발전되어 왔다. 그러나, “All Fiber-Optic Hydrophone”의 시스템 어레이를 구성하는데 있어서, 검출 신호에 대한 높은 감도성을 얻기위한 수단으로서



광섬유 격자(FBG)를 이용한 센서 시스템의 최대 장점은 한가닥의 신호 전송용 광섬유를 따라 많은 수의 광섬유 격자 센서를 부착하여, 광범위한 영역에 걸쳐 검출대상으로부터 응답을 얻을 수 있다. WDM(Wavelength Division Multiplexing)방법을 사용한 센서 시스템에서는 정보 전송속도, 광파워 손실, 신호대 잡음비, 파장 대역폭등의 문제점 때문에 최대 10개 정도의 센서를 부착할 수 밖에 없지만, TDM(Time Division Multiplexing)방법을 결합하여 사용하면, 광원의 스펙트럼을 재 사용할 수 있는 기술에 의거하여, 센서의 수량을 여러번의 배수 형태로 다양화 시킬 수 있다. [그림3]는 다양한 형태로 결합 구성된 WDM/TDM 방법의 FBG hydrophone 다중화 방법으로 제안된 그림이다.⁽⁵⁾ 이들 시스템은 허용할 수 있는 최대 동작거리를 고려 하여야 한다. 결합 구성된 WDM/TDM 종류는 한가닥의 광섬유 줄기에 파장이 각각 다른 FBG의 트랜스듀서를 직렬로 연결하는 serial system, 광결합 기를 사용하여 병렬로 여러 가닥을 연결하고, 각 노드마다 시간지연 효과를 주어 신호전송을 차등화 시켜, 구성되는 parallel system, 신호전송용 주 광섬유에 여러 개의 광결합기를 부착하여 각각의 광결합기로부터 새로운 가지를 만들어 시스템을 구성하고, 각각의 광결합기 뒷 단에 동일한 크기의 광섬유 루프를 달아서 시간지연 효과를 만든 branch system 형태가 있다.

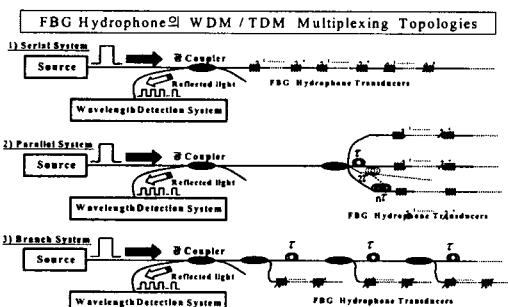


그림 3. 시간 및 파장분할 다중화 기술

Fig. 3. Time and Wavelength Division Multiplexing Techniques.

이들 시스템의 동작원리는 광원에서 shot pulse를 광섬유 가닥을 따라 연속적으로 면거리까지 위치해있는 FBG hydrophone의 트랜스듀서에 보내면, 음파 신호에 의하여 만들어진 광섬유 격자의 특정 반사파 신호가

연속적인 시간 지연을 가지고 검출기로 되돌아 온다. 광원에서 shot pulse가 발진된 후 광검출기에서는 단지 선택된 시간 창(window)동안에만, 광 검출기로 반사된 신호에 대하여 응답 한다. 즉, 여러개의 FBG의 트랜스듀서중에서 단 하나만의 파장이 검출기에 선택되어 진다. 광검출기 부근에 스캐닝 페브리-페롯 필터(scanning Fabry-Perot filter)를 부착하면, 광검출기에서 시간별 케이트(gate)로 제어 하므로 특정한 파장 대의 신호 검출이 가능하다. 여기서 FBG hydrophone 어레이 시스템이 동작할 수 있는 최대거리 결정은 광원과 최종단에 부착된 광섬유 격자로부터 반사되어 돌아온 검출기간의 신호감쇠에 대한 파라메타 L의 함수에 기인 한다. 우선 전송기에서 수신기까지 반사되어 전송된 신호 감쇠 파라메타를 L이라고 하고, 이때 최대로 허용할 수 있는 감쇠량은 L_{max} 라고 하면, 최대로 허용할 수 있는 거리가 X_{max} 일 때, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} L_{max} &= 10 \log \frac{P_T}{P_{IN_{min}}} \\ &= [P_T(dBm) - P_{IN_{min}}(dBm)] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, P_T 는 전송기 전력이고, $P_{IN_{min}}$ 은 최악의 경우에서 수신 감도이다. 따라서, FBG hydrophone 어레이 시스템이 동작할 수 있는 최대거리 결정은 다음과 같다.

$$X_{max} (\text{meter}) = \frac{L_{max} (dB) - FBG_{LOSS_{tot}} (dB)}{\text{신호전송 광섬유 감쇠량 } dB / (\text{meter})} \quad (10)$$

FBG_{LOSS} 는 어레이에 부착된 FBG hydrophone의 각 트랜스듀서에 대한 총신호 감쇠량이다.

2). Demodulation Techniques.

FBG hydrophone 어레이 시스템에서 트랜스듀서로부터 검출된 신호를 복조하는 방법에는 여러 가지 방법이 있다. 즉, 분광 분석기를 이용하면, 간단히 광섬유 격자 신호를 분석할 수 있으나, 응답속도가 느리고, 장비가 고가이므로 실용화 단계에 이용되기에에는 그 한계가 있다. 또한, 복조기로 마하-젠더 간섭계(MZI: Mach-Zehnder Interferometer)를 이용한 광섬유 격자 파장변이 측정법이 사용되고 있다. 이는 마하-젠더 간섭계의 한쪽 경로를 변조시켜 광섬유 격자의 파장 변

이를 검출하여 광검출기에서 출력신호의 위상으로 변조시키는 방법으로 고해상도의 고속측정이 가능하다.⁽⁷⁾ 그러나, 이러한 변조 방법은 마하-젠테 간섭계에 가해지는 온도변화에 민감한 영향을 받으므로, 온도 변화에 대한 간섭 신호의 위상 이동을 보상하기 위하여 반드시 보상 격자가 필요하다. 따라서, 세기 변조 방식의 FBG hydrophone 어레이 시스템에 적용할 수 있는 demodulation techniques로서는 현재까지 연구되고 있는 방법으로 [그림4]와 같이 active band-pass filter 시스템과 passive band-pass filter 시스템으로 나누어, 크게 두가지 유형으로 연구되고 있다.⁽⁸⁾

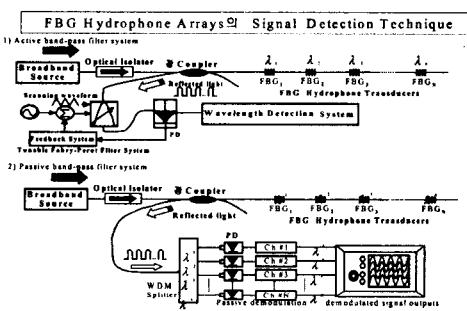


그림 4. FBG Hydrophone Array System의 Demodulation Techniques.

Fig. 4. Demodulation Technique of FBG Hydrophone Array System

FBG hydrophone 트랜스듀서는 협소한 파장대의 빛을 반사시키는 기능을 지니며, 수중에서 음파가 가해졌을 때, 중심파장이 가해진 음파에 대하여 선형적으로 변화 한다. 수중 음파를 광범위하게 모니터링 하기 위하여 많은 수의 트랜스듀서 어레이가 요구 된다. 대표적인 active band-pass filter로 사용되는 패브리-페로 필터(Fabry-Perot filter)는 시스템 구성이 간단하고, 비교적 간단하게 중심파장이 다른 여러개의 트랜스듀서들의 음파신호를 동시에 복조할 수 있으므로, 멀티플렉싱에 효율적으로 적용될 수 있다. 패브리-페로 필터가 다중 빔 간섭을 일으키는 필터를 통과하는 빛의 파장에 대한 세기는 [식11]과 같다.⁽⁹⁾

$$I(\lambda) = \frac{I_1 / I_{IN}}{1 + \left(\frac{2F}{\pi} \sin \frac{2\pi nl_c}{\lambda} \right)^2} \quad (11)$$

여기서, I 는 빛의세기, F 는 finesse, n 은 cavity index, l_c 는 cavity length이다. [식11]은 airy function으로서 $\text{Sin}(2\pi nl_c/\lambda)$ 가 0일 때, 최대값을 갖는 주기함수이다.

즉, $\frac{2\pi nl_c}{\lambda} = N\pi$ (N 은 정수)일 때, 빛의세기는 최대가 되며, 이때 파장은 다음과 같다. $\lambda = \frac{2nl_c}{N}$ 이되고 여기서, 주파수와 파장의 관계식 $f = \frac{C}{\lambda}$ (f 는 주파수, C 는 광속도, λ 는파장)를 대입하여 정리하면, [식12]와 같이 빛의 세기가 최대인 주파수를 구할 수 있다.

$$f = N - \frac{C}{2nl_c} \quad (12)$$

따라서, [식12]에 의하면, 최대값을 가지는 주파수는 필터의 간극이 일정할 때, 동일한 간격으로 분포된다. 패브리-페로 필터통과 신호의 profile에서 FSR(Free Spectral Range)은 근접한 두 peak사이의 영역으로서 주파수영역에서는 $\frac{C}{2nl_c}$ 로 일정하다.

필터로 작동하기 위해서는 매우 좁은 passband를 가져야 하며, 이것은 두 미러(mirror)의 반사율에 의하여 결정된다. 광범위한 영역과 다점 측정을 위한 FBG hydrophone 어레이 시스템을 구현하기 위해서는 여러 파장을 가진 FBG 트랜스듀서가 필요하므로 패브리-페로 필터는 여러 광섬유 격자 파장을 스캐닝 하는 방법으로 [그림4]와 같이 사용되어져야 한다. 필터 간격 조절을 위해서는 [그림4]의 1과 같이 별도의 스캐닝 패형을 tunable 패브리-페로 필터에 가해줌으로서 패브리-페로 필터의 간극(l_c)을 변화 시키고, 이 간극의 변화로 두 미러간 cavity공간의 변화로 이어져서, 필터의 통과 파장을 변화 시킨다. 그리고 필터의 통과 파장과 간극은 $\lambda = \frac{2nl_c}{N}$ 에 의해서 선형적인 관계를 가진다. 따라서 광검출기에서 피드백되는 신호 전압과 dither signal에서 일어나는 스캐닝파형과 검출된 파장을 일대일 대응 시킴으로서, 신호빛의 파장에 대한 분석이 가능하다. 이때, 필터에 인가되는 스캐닝 패형의 스캐닝 범위는 각각의 FBG 트랜스듀서들의 중심파장을 모두 포함해야 한다. 한편 이와같이 tunable 패브리-페로 필터를 이용한 active band-pass filter 시스템은 필터의 스캐닝 속도가 현재까지 개발된 주파수 범위가 300 Hz-1 KHz대 까지만 가능하는데 그 한계점이

있다. 따라서, 필터의 스캐닝 주파수 범위에 제한을 받지 않고, 단지 구성된 FBG hydrophone 어레이 시스템에 적용된 광검출기의 응답속도와 FBG 트랜스듀서들의 주파수 응답특성에만 관계되는 passive band-pass filter 시스템 경우는 협대역 투과 필터의 과정에 따른 광투과도가 다르다는 점을 이용하여, 수중 음압이 광섬유 격자의 트랜스듀서에 유기되어 브래그 파장조건 변화에 의한 신호 파장의 변화를 광세기의 변화로 신호 처리 하는 방법이다. 이는 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer)로 측정하기 어려운 작은 파장의 변화를 고속으로 쉽게 측정할 수 있다는 장점을 지니고 있는 반면, FBG 트랜스듀서의 증가 수량 많음, 광검출기와 필터의 수가 증가되어야 하는 단점도 지니고 있다.

IV. 실험 및 결과고찰

구성된 실험 시스템은 광섬유격자를 사용하여 설계 및 제작된 트랜스듀서 특성을 이용하여, 광범위한 영역에 걸쳐 다점 측정이 가능하도록, 시도하기 위한 선행 연구로써, 먼저 2개의 FBG 트랜스듀서를 분리된 수조에 넣고, 세기변조 방식의 FBG hydrophone Sensor 시스템으로 [그림5]과 같이 구성하였다. 실험에 사용된 2개의 FBG 트랜스듀서는 [그림6]과 같이 2장의 Diaphragm사이에 열 접합용 용매제를 첨가하고, FBG를 그사이에 정열 위치 시킨후, 공기가 주입되지 않도록 heating 하여, FBG와 diaphragm이 한 몸체를 이루고, 몸체가된 센싱부가 북처럼, 주변이 균일한 일정 장력으로 고정되도록 설계 하였다. 또한, 트랜스듀서에서 검출된 음향파 미세 신호의 응답특성과 검출거리의 증대를 꾀하기 위하여, FBG 출력단에 광섬유 증폭기를 부착하도록 설계 되었다. 이와같이 설계된 일체형 FBG diaphragm을 직경 10cm의 트랜스듀서 몸체 상단과 최대한 밀착시킨후, OSA(Optical Spectrum Analyser)로 관찰하여, FBG의 중심파장에 적정한 조건의 장력을 준후, 몸체에 고정 시켜 제작 되었다.

제작된 일체형 FBG 트랜스듀서를 통하여 외부에서 인가된 주파수를 광섬유 격자소자에 인가했을때, 인가된 베이스 밴드 신호가 FBG 일체형 diaphragm에 전달되어, 수중 음향파를 검출하도록 설계 하였으며, 실험에서 검출된 최대 수중 음향파 응답 주파수 대역은 약 1.4 KHz까지 신호검출이 되었다.⁽¹⁰⁾ 제작된 트랜스듀서의 주파수특성에 따른 신호대 검출 응답특성은 [표1]

세기변조방식의 FBG Hydrophone Array 실험도

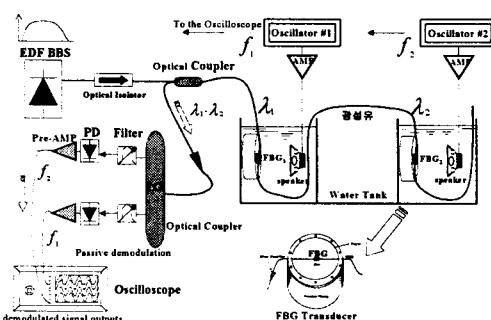


그림 5. 구성된 실험 시스템

Fig. 5. The constructed test system.

FBG 일체형 트랜스듀서 구조도

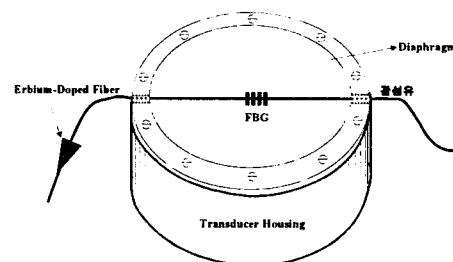


그림 6. 실험에 사용된 FBG 일체형 트랜스듀서 모양.

Fig. 6. The FBG one-body transducer used in the test

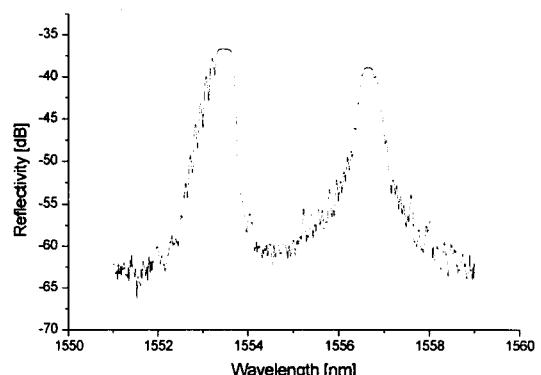
그림 7. 실험에 사용된 FBG₁과 FBG₂의 중심파장.

Fig. 7. The wavelength of the FBG1 and FBG2 used in the test

과 같다.⁽¹¹⁾ 실험에 사용된 2개의 FBG 트랜스듀서는 동일 특성을 지니고 있고, 그 형태도 같으나, FBG의 중

심파장이 [그림7]과 같이 각각 1553nm(FBG₁)와 1556.7nm(FBG₂)이다. 어레이 시스템 형태는 한가닥의 주 신호 전송 광섬유에 길게 늘어뜨린 끈형으로 구성한, serial system 방법을 도입하여, FBG₁ 트랜스듀서와 FBG₂ 트랜스듀서를 부착하였다. 검출된 신호의 복조 기술은 설계된 트랜스듀서의 검출 가능한 주파수 특성을 고려하여, passive band-pass filter 시스템 방법으로 구성하였다. 광원은 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier) BBS(Broad Band Source)를 사용하였고, 검출기는 2개의 포토다이오드를 사용하였다. 사용된 광섬유는 단일모드 광섬유이고, 센서로 사용된 광섬유 격자의 주기는 짧고, 균일한 간격을 가지고, 국내에서 제작된(KIST 광기술센타) 제품이다. 실험에 사용된 음원은 방수처리된 동일한 특성의 스피커(사용 주파수 범위: 1Hz ~ 20KHz)를 각각 수조에 넣어 사용 하였으며, oscillator를 통하여 싸인파 주파수를 30Hz ~ 5KHz 범위에서 가변하여 인가 하였다. 실험에 사용된 수조는 무향판이 설치된 2개의 유리 수조로서, 크기는 가로, 세로, 높이가 약 2m × 1m × 1.5m이다. 2개의 FBG 수중음향파 트랜스듀서에서 최종 검출된 음향파 신호는 2 × 1 coupler를 통과한 후, passive demodulation부와 pre-amp를 걸쳐 oscilloscope로 최종 신호처리 하였다. 이는 전형적인 세기변조 방법의 신호처리 기법인 것이다.⁽¹²⁾ 실험 결과 설계된 FBG₁ 트랜스듀서와 FBG₂ 트랜스듀서를 통하여, 수중음향파 주파수 30 Hz대부터 1.3 KHz대 까지 파장분할 방법을 사용하여, 신호의 다중점 검출이 가능 하였다. 따라서, FBG 트랜스듀서의 수를 늘리면, 광범위한 영역에 걸쳐, 검출 대상에 대한 동일 주파수 신호의 센싱 점(sensing point)을 확대 할 수 있고, 신호 특성이 다른 주파수대의 음파를 동시에 다발적으로 검출 가능함을 제시 하였다. 아울러, 설계된 FBG 트랜스듀서는 수중 음향파 주파수 1.3 KHz대까지 범위에서 FBG hydrophone 어레이 시스템 구성이 가능하고, 음원의 각도 및 방향에 따라 검출된 신호의 응답특성이 차별화 되어, 비교 검출됨으로써, 설계된 트랜스듀서는 음원의 위치와 각도에 따른 신호의 지향성을 탐지 할 수 있다.[그림8]와 [그림9]은 수중 음향파 주파수 300 Hz대, 400 Hz대와 설계된 FBG 트랜스듀서의 최대 검출 가능한 주파수대역인 1.3 KHz대에서 2개의 트랜스듀서를 통한 다중점 신호검출에 대한 실험 결과이다.

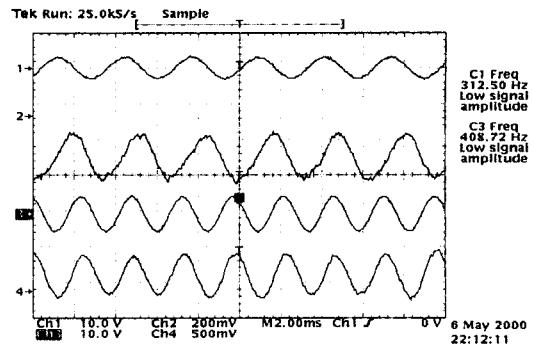


그림 8. 주파수 300Hz, 400Hz대에서 검출된 신호 패형들.
(채널1: 오실레이터1의 음원입력신호, 채널2: FBG₁의 트랜스듀서에서 검출된 신호, 채널3: 오실레이터2의 음원입력신호, 채널4: FBG₂의 트랜스듀서에서 검출된 신호.)

Fig. 8. The signal wave-types detected in the 300Hzs and 400Hzs (Channel 1: The sound source input signal of the oscillator 1, Channel 2: The signal detected in the FBG₁ transducer, Channel 3: The sound source input signal of the oscillator 2, Channel 4: The signal detected in the FBG₂ transducer)

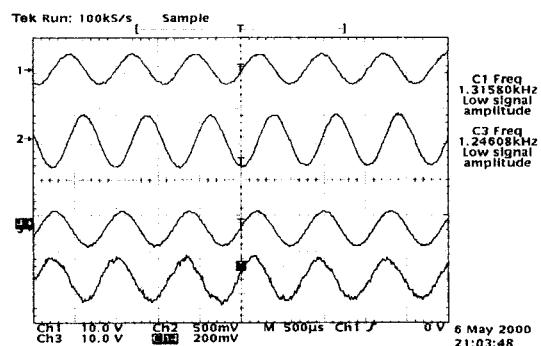
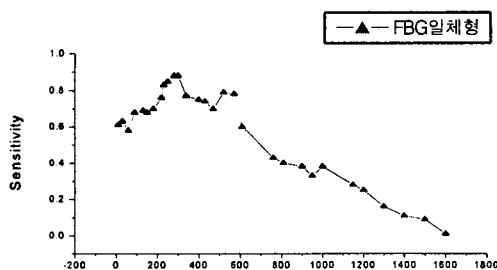


그림 9. 주파수 1.2kHz, 1.3kHz대에서 검출된 신호 패형들.
(채널1: 오실레이터1의 음원입력신호, 채널2: FBG₁의 트랜스듀서에서 검출된 신호, 채널3: 오실레이터2의 음원입력신호, 채널4: FBG₂의 트랜스듀서에서 검출된 신호.)

Fig. 9. The signal wave types detected in the 1.2KHzs and 1.3KHzs (Channel 1: The sound source input signal of the oscillator, Channel 2: The signal detected in the FBG₁ transducer, Channel 3: The sound source input signal of the oscillator 2, Channel 4: The signal detected in the FBG₂ transducer)

표 1. FBG 일체형 트랜스듀서의 주파수응답 특성표
Table 1. The characteristics wave response in the united type transducer of the FBG



감사의 글

본 연구는 1999년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소 과제연구비에 의해서 연구되었음.

V. 참고문헌

- [1] P.Shajenko , "Fiber-Optic Acoustic array" J. Acoust. Soc. Am., vol.59, pp.527, 1976.
- [2] J.N.Field, C.K.Asawa, O.G.Ramer, and M.K. Barnoski, "Fiber optic pressure sensor" J.Acoust. Soc. Am Vol 67, 1980.
- [3] Othonos kalli. Fiber Bragg Grating, Artech House PP.302-303, 1999.
- [4] C.M.Davis and R.E.Einzig "Optic Sonar System Concepts" IEEE(CH1476-1/79), PP.604. 1979.
- [5] Kersey, A.D.,et al. "Fiber Grating Sensors" IEEE Journal of Lightwave Technology. Vol 15, 1997, PP1442-1463.

- [6] "Introduction to Fiber Optic and AMP Fiber-Optic Products" AMP INC, Handbook, HB5444, PP52-53
- [7] Kersey, A.D. "Interrogation and Multiplexing Techniques for Fiber Bragg Grating Strain-Sensors" Society of photo-optical Instrumentation Engineers, Distributed and Multiplexed Fiber-Optic Sensors III. Boston, Sept 1993, Vol 2071, PP30-48.
- [8] Kalli,K., et al. "Wavelength division and spatial multiplexing using tandem interferometers for Bragg Grating Sensor networks" Optics Letters, Vol 20, 1995, PP2544-2546.
- [9] Kersey, A.D., Berkoff, T.A., and W.W. Morey, Multiplexed Fiber Bragg Grating Strain-Sensor system with a fiber Fabry-Perot Wavelength filter." Optics Letters, Vol 18, 1993, PP1370-1372.
- [10] 김경복, 김성순, 정제명, 곽계달, 이상배, 최상삼 "주파수 특성 개선을 위한 FBG 수중음향 센서의 트랜스듀서 설계 및 제작" 제7회 광전자 및 광통신 학술회의(COOC 2000) 논문집, 대한전자공학회합동, PP.157, 2000.
- [11] 김경복, 김성순, 정제명, 곽계달, 이상배, 최상삼 "광섬유격자(FBG)를 이용한 하이드로폰 개발에 관한연구" 한국음향학회, PP.407, 2000.
- [12] 김경복, 김성순, 곽계달, 이상배, 최상삼. "단일모드 FBG를 이용한 저주파수 수중 음향센서" 한국광학회, PP.246, 2000.

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), 1984년-1992년 LG전선(주)연구소

광시스템설 근무(선임연구원), 1992년-현재 경복대학교 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.