

## 광섬유 하이드로폰 배열의 수중음향 감지특성 연구

이종길

## Characteristics of Underwater Sound Detection of the Fiber Optic Hydrophone Array

Jongkil Lee

## 요약

저주파용 광섬유 하이드로폰을 개발하기 위하여 본 논문에서는 2 채널을 가진 TDM 방식 광섬유 하이드로폰 배열을 구성하고 이를 수조에서 음향특성 실험을 수행하였다. 150m의 광섬유를 중공 원통형 맨드릴에 감아 광섬유 하이드로폰을 제작하였으며 저주파용임을 감안하여 맨드릴의 고유진동수를 10kHz 이상에 위치하도록 설계하였다. 제작된 광섬유 하이드로폰은 수중과 음향 임피던스 정합을 이루기 위하여 폴리우레탄으로 몰딩 하였다. 음향 특성을 보기 위하여 TDM 방식의 불평형 간섭계를 구성하여 수조에서 3kHz의 연속파형을 신호입력으로 실험 하였다. 실험 결과 제작된 TDM 방식의 광섬유 하이드로폰은 수중에서 3kHz의 음향 신호를 안정적으로 검출함을 확인 하였다. 이는 향후 다채널을 가진 광섬유 하이드로폰 배열 개발에 응용 가능성이 기대된다.

## Abstract

In this paper, to develop the fiber optic hydrophone for the use of low frequency applications, two channels TDM(Time Division Multiplexing) fiber-optic hydrophone array was fabricated and their acoustic characteristics were investigated in the acoustic water tank. A fiber length of the order of 150m is wound at the hollow cylinder type aluminum mandrel and the fundamental natural frequency of the mandrel maintained above 10kHz. An unbalanced interferometer (discrete Mach-Zehnder type) was used. Sound detection performance is tested in the underwater tank with 3kHz continuous sound source. Finally, it is shown that two channels TDM fiber-optic hydrophone array can detect 3kHz sound stably. This results can also applicable for the development of multi-channel fiber optic hydrophone array.

## 1. 서론

광섬유 센서는 광섬유를 따라 도파하는 광의 미소한 위상 변화를 측정하는 광간섭계 기술(optical interferometry technique)을 이용하여 음장, 자기장과 기계적인 압력장을 전기적으로 변환할 수 있는 기구로서 이것은 음장의 경우 음향 신호가 광섬유에 응력으로

작용하고 그 기계적 응력이 광섬유내 광학적 경로 길이에 영향을 주는 광탄성 효과를 이용하는 것이다. 이러한 광섬유의 변환기구를 이용한 광섬유 하이드로폰 배열(optical hydrophone array)은 현재 미국 및 유럽등지에서 잠수함이나 해저 고정형 센서로서 개발중에 있으며 광섬유의 저손실화가 1970년대 초반부터 연구됨에 따라 이를 이용한 광섬유 부품의 개발이 이루어지고 따라서 보다 효율적인 광섬유 하이드로폰이 개발되

안동대학교 기계공학교육과 (Mechanical Engineering Education Department, Andong National University)

<접수일자 : 1999년 1월 15일>

기에 이르렀다<sup>11)</sup>.

수중음향 신호의 효율적인 감지를 위하여 수중음향 광섬유 하이드로폰의 개발은 미국의 NRL(Naval Research Laboratory), 영국의 TMS(Thomson Marconi Sintra) 및 이탈리아의 Whitehead Alenia사등지에서 활발히 수행되고 있으며<sup>11)</sup> 특히 1980년 후반부터 급속도로 많은 연구가 수행되어 연구 결과들이 발표 되고 있는데 미국의 NRL에서는 최근에 64채널 배열형 광섬유 하이드로폰을 개발하여 실험하였다<sup>12)</sup>. 현재의 광섬유 수중음향 하이드로폰 제작 기술은 주로 압전소자를 이용한 센서들과 비교하여 경쟁할 만한 위치에 와있으며 미래의 배열형 광섬유 소자에 적용될 수 있는 기술로 인식되고 있다. 넓은 범위의 광섬유 하이드로폰 기술이 오래전에 소개 되었으나 DRA(Defense Research Agency)에서는 TDM방식 간섭계(Time Division Multiplexed Interferometric System)를 사용하였는데 이 방식은 음장에서 상호 작용되어 광섬유의 코일을 통과한 빛의 위상 변화를 감지하는 기능이다<sup>13)</sup>. 이 위상 변화는 고감도의 간섭계 기술을 이용하여 감지된다. 일반적인 광섬유 하이드로폰은 약 100m의 표준 단일모드 광섬유로 구성되며 맨드릴(mandrel)에 감겨 에폭시 수지(epoxy resin)로 감싸진다.

개개의 하이드로폰들은 TDM(Time Division Multiplexing), FDM(Frequency Division Multiplexing), WDM(Wavelength Division Multiplexing), CDM(Coherence Division Multiplexing) 등의 다양한 기술을 이용하여 단일 광섬유 속에 다중화(multiplexing) 시킬 수 있으며 이러한 기술들은 주요한 하이드로폰을 이용하여 증명되었다<sup>14)</sup>. 지금 현재는 TDM방식이 최고 30개의 하이드로폰을 단일 광섬유에 다중화 시킬수 있는 단순화 및 성능의 최선의 조합을 제공하는것으로 생각되어진다. 광섬유 하이드로폰은 영국의 DERA에서 일반적인 하이드로폰의 대체용으로 개발중에 있으며 이러한 시스템은 피에조 시스템(piezoelectric system)과 비교하여 많은 장점을 가지고 있다.

광섬유 센서의 감도를 높이고 또한 적용 주파수 범위에서 센서로서의 역할을 하기위한 방법으로 광간섭계의 개발과 광섬유의 권선 및 맨드릴의 구조설계에 대하여 이론 및 실험적인 연구가 많이 발표되었으나<sup>15)</sup> 거주파 수중음향의 감지에 적합한 배열 시스템은 아직 미흡한 실정이다. 광섬유 센서를 이용한 배열은 하나의 광섬유에 센서들의 채널을 많이 늘릴수 있으며 다양한 형태의 센서를 설계할 수 있다. 광섬유 배열 구조는 multiplexing 방식과 밀접한 연관이 있으며 TDM 방식은 초기부터 연구되어온 방식으로 가장 단순하면

서도 효율적이어서 현재도 꾸준히 연구되고 있는데 기본원리는 입력광을 펄스형태로 입사하여 각 감지센서를 거쳐 나오는 출력 광펄스의 시간차를 이용하는 것이다. Lee<sup>16)</sup>는 TDM 방식의 2채널 광섬유 센서 배열을 구성하고 이것을 합성 헤테로다인(synthetic heterodyne) 신호처리 기법을 이용하여 음향신호 특성을 분석 하였다. 따라서 본 논문에서는 Lee<sup>16)</sup>의 불평형 간섭계를 이용하여 수중에서 저주파 음원에서 방사된 3kHz의 음향신호를 감지하기 위하여 제작된 두 개의 광섬유 하이드로폰을 배열로 구성하고 이것의 음향 감지 특성을 실험으로 분석하였다.

## 2. 음향 감지부의 설계

광섬유 하이드로폰의 설계는 현재에도 사용이 되고 있는 방법으로서 코일을 감은 구조로 매우 간단하며 현재는 특수한 목적을 위하여 많이 변형 되어 있으며, 컴플라이언스(compliance) 및 감도를 증가 시키기 위하여 공기 공동(air cavities)<sup>17)</sup>이나 거품층(foam layers)을 사용하고 있다<sup>10-11)</sup>. 또한, McDearmon<sup>12)</sup>은 push-pull형 광섬유 하이드로폰을 제작하여 그 특성을 이론해석 하였으며 Nash<sup>13)</sup>등은 2차원적 수치해석 기법을 이용하여 광섬유 하이드로폰의 감도해석을 수행 하였다.

본 실험에 사용된 광섬유 하이드로폰은 맨드릴에 단일모드 광섬유가 감긴 형태이며 음향 감지 성능을 높이기 위하여 중공 원통형 알루미늄 맨드릴을 사용 하였다. 맨드릴의 설계 치수는 길이가 6.0cm, 반경이 2.5cm 이고 두께가 0.25cm이며 이것의 기본 고유진동수(fundamental natural frequency)는 11.3kHz이며 이것의 진동 모우드는 radial-axial mode이다. 외부 음향 신호가 저주파에서 구동 될 때 맨드릴과의 공진현상을 피하기 위하여 기본 진동수가 10kHz이상 이 되도록 맨드릴 설계치를 정하였으며 경계조건은 자유단(free-free)인것으로 가정 하였다.

설계된 치수로 맨드릴을 제작하여 맨드릴의 표면에 길이가 150m인 단일모드 광섬유를 감아 광섬유 하이드로폰을 제작 하였다. 실험에 사용된 광섬유는 사용 광파장이 1300nm인 단일모드 광섬유 이며 광손실은 0.1dB/km이다. 하이드로폰의 양쪽 끝단은 음향 신호의 입력을 막기 위하여 음향 차단 재질인 corprene를 접착하였다. 또한 수중에서 실험하기 위하여 물속과 음속이 매우 유사한 폴리우레탄으로 하이드로폰의 표면을 몰당하여 안정성을 높였다. 그림 1에는 본 연구에 사용된 설계 하이드로폰의 배열을 보였다.

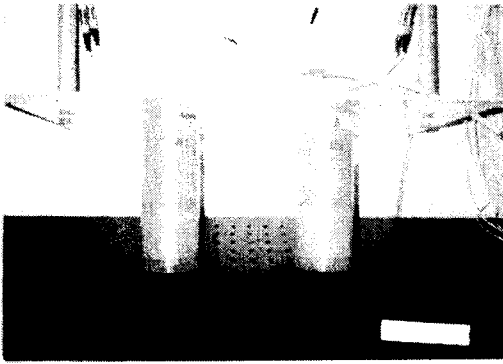


그림 1. 광섬유 하이드로폰 및 배열 사진  
Fig. 1 Photograph of the fiber-optic hydrophones and its array

3. 불평형 배열 간섭계의 구성 및 제작

본 실험에 사용된 불평형 간섭계의 구성 및 하이드로폰 배치를 그림 2에 보였다. 본 실험에 사용된 간섭계 형태는 PMDI(Path-Matched Differential Interferometry)형이며 이는 신호처리를 쉽게 할 수 있도록 간섭계를 감지 간섭계와 보상 간섭계 두 부분으로 분리 하는 것을 말한다.<sup>18)</sup> 이 간섭계는 감지 광통로와 기준 광통로간의 광경로차 또는 시간차가 매우 큰 불평형 Mach-Zehnder 간섭계(Unbalanced Mach-Zehnder Interferometer)로 이루어져 있다. 본 실험에서는 간섭계의 한쪽 광통로에 걸어주는 수십 kHz의 위상변조 및 위상변조 신호와 주파수가 같고 동기된 신호로 간섭계 출력을 진폭변조 하는 합성 헤테로다인(synthetic heterodyne) 신호처리 기법을 이용하였다.

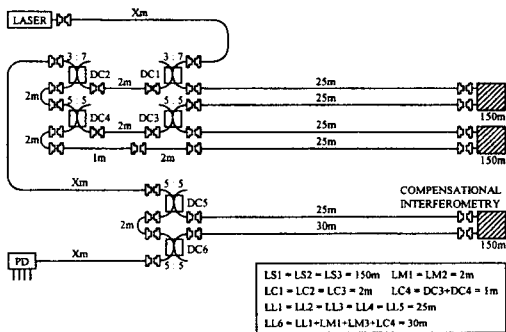


그림 2. 광섬유 하이드로폰 배열 구성도  
Fig. 2 Cofiguration of the fiber-optic hydrophone array

TDM 방식의 직접적인 접근법은 각각의 Mach-Zehnder 간섭계를 적당한 시간지연을 갖도록 연결한 다음 펄스화된 광원을 사용하여 개별 하이드로폰들의 정보를 얻는것이다. n개의 하이드로폰배열 이라면 하나의 입력 광펄스에 대해 n개의 출력 펄스열들이 나오게 된다. 간섭계의 광경로차가 작기 때문에 기존 경로와 신호 경로를 통과한 펄스들은 서로 겹쳐서 간섭하게 되고 결국 출력 펄스열은 각각의 단일 하이드로폰의 출력을 시간순으로 배열한 것이된다.

결과적으로 본 실험과 같은 구조인 두 개의 하이드로폰을 갖는 배열구조에서 한 개의 광펄스가 TDM의 기본구조에 입사되면 간섭펄스 두 개를 포함해서 모두 네 개의 출력펄스가 생기게 되며 그 중에서 간섭을 일으킨 펄스 두 개만을 분리해서 간섭무늬 변화를 분석하면 위상변화를 일으킨 외부 음압을 측정할 수 있다. 그림 2에서와 같이 간섭계의 방향성 결합기에서 각각의 하이드로폰 쪽으로는 길이가 25m인 통신용 광섬유 케이블을 이용하였다. 광케이블 사이에는 슬리브형 콘넥터(connector)를 사용하였으며 이것의 접촉면에는 index matching oil을 도포하여 굴절률 차이에 의한 광손실을 최소화 하였다. 따라서 두 개의 광섬유 하이드로폰 및 보상간섭계에 적용된 광섬유의 총길이는 레이저 출력단에서부터 PD까지 총 630m 이다.

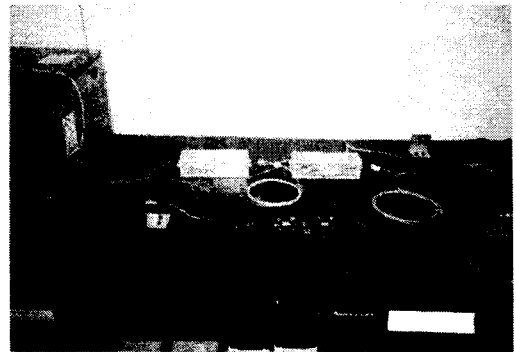


그림 3. 구성된 광섬유 간섭계  
Fig. 3 Cofiguration of the fiber-optic interferometer

시분할 다중방식을 이용한 2채널 센서 불평형 간섭계 배열의 실체를 그림 3에 보였다. 여기서 방향성 결합기의 음향 차단효과를 극대화 하기 위하여 차단막 장치를 고안 하였으며 지상에 노출된 광케이블은 음향에 의한 간섭을 최소화 하였다. 광원은 파장이 1319nm 인 Nd-YAG 레이저를 사용 하였으며 광펄스 발생기는 광-음향 변조기(AOM, Acousto-Optic Modulator)와 구동 드라이버, 펄스 발생기를 사용하여 발생 시켰다.

감지 간섭계와 보상 간섭계 사이에 광경로차가 존재하나 이는 광원으로 사용한 Nd-YAG 레이저의 가간섭 길이가 10km이상 이므로 불일치로 인한 위상잡음은 상당히 작다고 볼 수 있다. 신호처리를 위한 변조신호와 모의 음향신호를 발생 시키기 위한 위상 변조기는 PZT에 광섬유를 감아서 사용하였고 간섭 펄스가 최대의 가시성을 갖게하기 위하여 Fiber-Pro의 고리형 광섬유 편광조절기를 사용 하였다. 보상간섭계는 주위 환경 잡음의 영향을 최소화 하도록 음향 차폐상자로 제작 하였다.

#### 4. 배열 음향 실험 및 결과

본 연구에서는 다채널을 가진 광섬유 센서 시스템을 개발하기 위한 센서 배열로서 TDM 방식의 2채널 광섬유 하이드로폰 배열을 제작하여 그 특성을 실험으로 측정하였다. 광섬유 수중음향 하이드로폰 배열의 음향 감지 성능을 확인하기 위하여 그림 4와 같이 실험 장치를 구성하고 음향 수조에서 실험 하였다. 음향수조는 길이, 폭 및 깊이가 각각 18m, 10m, 10m이며 정재파 (standing wave)를 제거하기 위하여 약간 찌그러진 형상이며 음향 수조속은 청수(fresh water)로 채워져 있다. 음원으로는 Flexensional형 저주파 음원기(model: BAeSEMA GRP 1500Hz Flexensional Transducer)를 사용하였고 이것은 주파수 대역 2kHz ~ 4.5kHz에서 평탄한 감도특성을 가지고 있다. 따라서 본 실험에서 사용하고자 하는 저주파 영역인 2~4kHz에서 송신감도의 변화없이 안정적으로 음을 방사할수 있음을 알 수 있다. 음원은 함수 발생기(SRS DS345)로 일정한 주파수 및 진폭으로 구동 하였다.

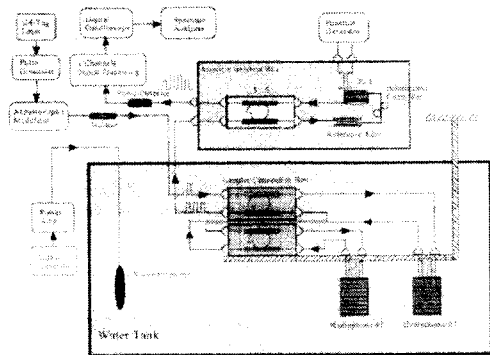


그림 4. 광섬유 하이드로폰 배열 실험 구성도  
Fig. 4 Experimental set-up of the fiber optic hydrophone array

실험은 먼저 음원 및 광섬유 하이드로폰 배열을 음향 수조에 담근후 레이저를 광섬유 간섭계에 입사 시킨다. 펄스 발생기를 통하여 폭이 370ns, 발생을 500kHz로 펄스를 AOM 구동기에 인가하여 AOM을 통과한 빛이 펄스화 되어 불평형 간섭계에 입사 되도록 하였다. 하나의 입력 광펄스가 첫번째와 두번째 하이드로폰을 통과하고 나면 새개의 광펄스로 되며 보상간섭계를 지나면 네 개의 펄스로 변환되어 이것을 신호처리 하면 음향출력을 볼 수 있으며 수중에서의 음압이 광섬유 하이드로폰에 도달하면 광섬유 자체에 길이 변화를 일으켜 결국 광 위상차로 검출이 된다.

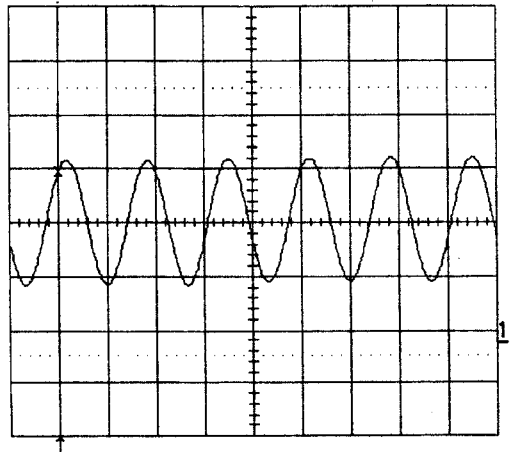


그림 5. 대역 통과 필터를 지난후 하이드로폰 #1의 음향 신호 (수직: 0.5V/div., 수평: 0.2ms/div.)  
Fig. 5 Output acoustic signal of the first hydrophone after band pass filter (0.5V/div. in vertical and 0.2ms/div. in horizontal)

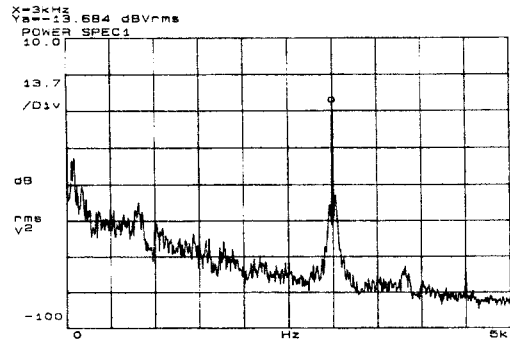


그림 6. 첫 번째 광섬유 하이드로폰의 음향 스펙트럼 (500Hz/div.)  
Fig. 6 Acoustic spectrum signal of the fiber optic hydrophone #1(500Hz/div.)

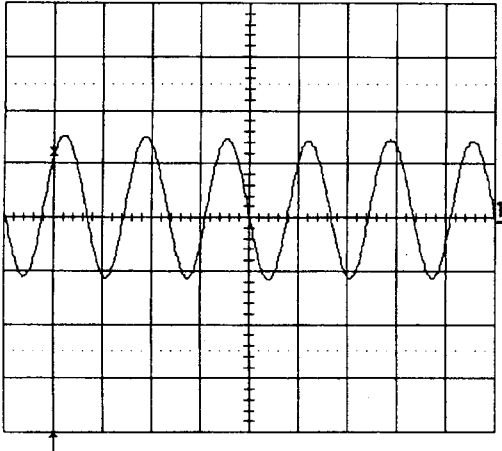


그림 7. 대역 통과 필터를 지난후 하이드로폰 #2의 음향 신호(수직: 0.2V/div., 수평: 0.2ms/div.)

Fig. 7 Output acoustic signal of the second hydrophone after band pass filter (0.2V/div. in vertical and 0.2ms/div. in horizontal)

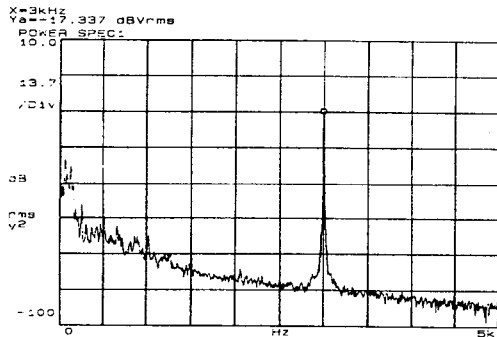


그림 8. 두 번째 광섬유 하이드로폰의 음향 스펙트럼 (500Hz/div.)

Fig. 8 Acoustic spectrum signal of the fiber optic hydrophone #2(500Hz/div.)

본 실험에서는 저주파 음원기에서 3kHz의 싸인파(sin wave) 음향 신호를 수중에서 발생 시키게 하고 배열을 통한 감지 센서부인 하이드로폰의 음향 감지 특성을 보았다. 그림 5는 신호처리단의 대역 통과 필터를 거친 첫번째 하이드로폰의 출력을 보인 것이며 그림 6은 이것의 스펙트럼을 분석(-13.684 dBV at 3kHz)한 것이다. 그림 7은 신호처리단의 대역 통과 필터를 거친 두번째 하이드로폰의 출력을 보인 것이며 그림 8은 이것의 스펙트럼을 분석(-17.337 dBV at 3kHz)한 것이다. 그림 5 및 7에서와 같이 시간에 따라 광섬유 하이드로폰은 진폭변화 및 신호소멸등의 현상이 발생

하지 않고 깨끗한 음향신호를 매우 안정적으로 검출함을 확인 할 수 있다. 그림 6 및 8에서와 같이 스펙트럼의 크기가 다른 이유는 광간섭계에 사용된 광결합기의 분배비율이 이론해석의 경우와 같이 정확한 정수비율로 나누어지지 않기 때문이며 이는 정확한 분배비율을 가진 광결합기의 사용으로 보상이 가능하다고 판단된다. 또한 배열의 개수를 늘리기 위하여 위상 잡음을 포함한 신호의 잡음이 원하는 신호펄스로 전이되지 않도록 하고 광검출기의 커플링과 스위칭 회로의 개선을 한다면 배열 시스템의 음향 감지 특성이 보다 향상될 수 있다고 판단 된다. 본 실험을 통하여 불평형 간섭계를 이용한 광섬유 하이드로폰 배열의 음향신호 감지 특성이 특히 저주파에서 매우 안정적임을 확인 하였으며 이는 배열의 갯수 즉, 채널의 갯수를 계속 늘려도 같은 결과를 얻을 것임을 예상할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 불평형 간섭계를 이용한 광섬유 수중 음향 하이드로폰 배열의 음향 감지 성능을 확인하기 위하여 2개의 하이드로폰을 배열로 장착 하고 감지 간섭계와 보상 간섭계가 있는 PMDI 기법을 사용하여 TDM방식을 이용한 신호처리 기법으로 음향 감지 특성을 실험으로 확인하였다. 실험에서는 저주파 음원기에서 3kHz의 싸인파(sin wave) 음향 신호를 수중에서 발생 시키게 하고 배열을 통한 감지 센서부인 하이드로폰의 음향 감지 특성을 보았다. 본 실험의 결과로 불평형 간섭계형과 TDM 방식의 신호처리가 배열의 효율성을 높이고 안정적인 음향 신호를 감지하는 특성이 있음을 확인 하였으며 이는 배열의 갯수 즉, 채널의 갯수를 계속 늘려도 같은 결과를 얻을 것임을 예상할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] 이종길, 윤형규, 서인창, "광섬유 하이드로폰 및 소나 기술 현황," 국방과 기술, 제205호, pp. 48-61, 1996.
- [2] A. Kersey *et al.*, "64-element time division multiplexed interferometric sensor array with EDFA telemetry," OFC '96 Technical Digest 2, pp. 270-271, 1996.
- [3] P. Nash, "Optical fibre hydrophone technology for sonar systems," *Conference Proceedings of the 95 Undersea Defence Technology*, France, 1995.

- [4] J. P. Dakin and C. A. Wade, "Optical Fibre Hydrophone Array-Recent Progress," SPIE 514, pp. 375-379, 1984.
- [5] J. H. Cole and J. A. Bucaro, "Measured Noise Levels for a Laboratory Fiber Interferometric Hydrophone," Journal of Acoustical Society of America, 67(6), pp. 2108-2109, 1980.
- [6] G. W. McMahon and P. G. Cielo, "Fiber Optic Hydrophone Sensitivity for Different Sensor Configurations," Applied Optics, Vol. 18, No. 22, pp. 3720-3722, 1979.
- [7] A. Dandridge and A. D. Kersey, "Overview of Mach-Zehnder Sensor Technology and Applications," Fiber Optic and Laser Sensors VI, SPIE Vol. 985, pp. 34-52, 1988.
- [8] 이종길, "TDM 방식의 2채널 광섬유 센서 배열 특성 연구," 센서학회지, 제7권 제5호, pp. 306-312, 1998.
- [9] J. A. Bucaro, B. H. Houston, and E. G. Williams, "Fiber-Optic Air-Backed Hydrophone Transduction Mechanisms," Journal of Acoustical Society of America, 89(1), pp. 451-453, 1991.
- [10] J. A. Bucaro and H. D. Dardy, "Fiber-Optic Hydrophone," Journal of Acoustical Society of America, 62(5), pp. 1302-1304, 1977.
- [11] D. A. Brown, T. Hofler, and Garrett, "High-Sensitivity, Fiber-Optic, Flexural Disk Hydrophone with Reduced Acceleration Response," Fiber and Integrated Optics, Vol. 8, pp. 169-191, 1989.
- [12] G. F. McDearmon, "Theoretical Analysis of a Push-Pull Fiber-Optic Hydrophone," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-5, No. 5, pp. 647-652, 1987.
- [13] P. J. Nash and J. Keen, "Design and Construction of Practical Optical Fiber Hydrophones," Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 12, Part 4, pp. 201-212, 1990.
- [14] A. Dandridge and A. D. Kersey, "Overview of Mach-Zehnder Sensor Technology and Applications," Fiber Optic and Laser Sensors VI, SPIE Vol. 985, pp. 34-52, 1988.
- [15] R. Sato, K. Dobashi, Y. Kohama, and M. Egawa, "A study on the fiber-optic hydrophone array," The Proceedings of the '94 UDT Conference, U. K., 1994.

※ 본 연구는 1998년도 안동대학교 학술연구조성비 지원에 의한 논문입니다.

---

著 者 紹 介

---

이종길(李種吉)

『센서학회지 제7권 제5호』 논문98-7-5-02, pp.306 참조  
현재 안동대학교 기계공학교육과 조교수