

불평형 간섭계를 이용한 광섬유 청음기 배열의 수중음향 감지특성 연구

⁰이종길*, 남성현**, 윤형규**

Investigation of Underwater Sound Detection Characteristics of Fiber Optic Hydrophone Array by using an Unbalanced Interferometer

⁰Jongkil Lee*, Syunghyun Nam**, and Hyunggyu Yoon**

ABSTRACT

Optical sensing techniques have been associated with high sensitivity and precise measurements and attracted considerable attention in recent years. In this paper, two channels TDM(Time Division Multiplexing) fiber-optic hydrophone array for the underwater applications was fabricated and their acoustic characteristics were investigated by using the acoustic water tank. A fiber length of the order of 100m is wound at the hollow cylinder type aluminum mandrel. An unbalanced interferometer (discrete Mach-Zehnder type) was used. Sound detection performance is tested in the underwater tank with 2kHz continuous sound source. Finally, it is shown that two channels TDM(Time Division Multiplexing) fiber-optic hydrophone array can detect 2kHz sound stably.

1. 서론

광섬유의 저손실화가 1970년대 초반부터 연구됨에 따라 이를 이용한 광섬유 부품의 개발이 이루어지고 따라서 보다 효율적인 광섬유 센서가 개발되기에 이르렀다[1]. 수중음향 신호의 효율적인 감지를 위하여 수중음향 광섬유 청음기의 개발이 미국의 NRL, 영국의 TMS 이태리의 Whitehead 사등에서 활발히 수행되고 있으며 특히 1980년 후반부터 급속도로 많은 연구가 수행되어 연구 결과들이 발표되고 있다. 특히 미국의 NRL에서는 64채널 배열형 광섬유 청음기를 개발하여 실험하였다.

현재의 광섬유 수중음향 청음기 기술은 주로 압전소자를 이용한 센서들과 비교하여 경쟁할만한 위치에 와있으며 미래의 배열형 광섬유 소나에 적용될 수 있는 기술로 인식되고 있다[2-10].

광섬유 센서를 이용한 배열은 하나의 광섬유에 센서들의 채널을 많이 늘릴수 있으며 다양한 형태의 센서를 설계할 수 있다. 따라서 다양한 형태의 센서들중 비교적 감도가 높고 특정 배열 시스템에 적용하기가 용이한 형태는 간섭계형 센서로 알려져 있다. 배열형 센서는 적절한 광섬유 배열구조를 사용하여 하나의 광섬유 가닥에 많은 갯수의 센서들을 연결할 수 있는데 이러한 방식은 다채널을 요구하는 지금의 소나 시스템에 필수적이라 할 수 있다. 광섬유 배열 구조는 multiplexing 방식과 밀

* 안동대학교 기계공학교육과, 종신회원

** 국방과학연구소

접한 연관이 있으며 주로 연구되어온 multiplexing 방식은 TDM, WDM 및 FDM 방식 등이다. TDM 방식은 초기부터 연구되어온 방식으로 가장 단순하면서도 효율적이어서 현재도 꾸준히 연구되고 있는데 기본원리는 입력광을 펄스 형태로 입사하여 각 감지센서를 거쳐 나오는 출력 광펄스의 시간차를 이용하는 것이다. 이러한 TDM 시스템에서는 광출력을 효과적으로 사용하고 각 배열 센서 채널에 레이저 출력을 균등하게 배분하는 문제와 sampling율이 배열 시스템 설계의 제한 요소로 되고 있다.

본 연구에서는 불평형 간섭계(unbalanced interferometer)를 이용한 수중 음향 광섬유 청음기를 가장 단순한 형태인 2채널(청음기 2개) 센서 배열을 구성하고 이것을 synthetic heterodyne 신호처리 기법을 이용하여 음향신호 특성을 분석 하였다.

2. 음향 감지부의 설계

본 실험에 사용된 광섬유 청음기는 맨드릴(mandrel)에 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 mode임이 확인 되었다. 외부 음향 신호가 저주파에서 구동 될 때 맨드릴과의 공진현상을 피하기 위하여 기본 진동수가 10kHz 이상인 맨드릴로 설계치를 정하였으며 경계조건은 free-free 인것으로 가정 하였다[7, 8, 10].

설계된 치수로 맨드릴을 제작하여 여기의 표면에 길이가 100m 인 단일모드 광섬유를 감아 청음기를 제작 하였다. 실험에 사용된 광섬유는 사용 광파장이 1300nm 인 단일모드(single mode) 광섬유 이며 광손실은 0.1dB/km 이다.

청음기의 양쪽 끝단은 음향 신호의 입력력을 막기 위하여 음향 차단 재질인 corprene 을 접착하였다. 또한 수중에서 실험하기 위하여 물속과 음속이 매우 유사한 폴리우레탄으로 청음기의 표면을 몰딩하여 안정성을 높였다. Fig. 1 에는 본 연구에 사용된 청음기의 배열을 보였다.



Fig. 1 Photograph of the fiber-optic hydrophone and its array

3. 불평형 배열 간섭계의 구성

TDM 방식의 직접적인 접근법은 각각의 Mach-Zehnder 간섭계나 Michelson 간섭계를 적당한 시간지연을 갖도록 연결한 다음 펄스화된 광원을 사용하여 개별 센서들의 정보를 얻는것이다. N 개의 센서배열 이라면 하나의 입력 광펄스에 대해 N 개의 출력 펄스열들이 나오게 된다. 간섭계의 광경로차가 작기 때문에 기준 경로와 신호 경로를 통과한 펄스들은 서로 겹쳐서 간섭하게 되고 결국 출력 펄스열은 각각의 단일 센서의 출력을 시간순으로 배열한 것이된다.

본 실험에 사용된 불평형 간섭계의 센서 배치 및 광섬유의 배치를 Fig. 2 에 보였다. 그림에서와 같이 간섭계의 방향성 결합기에서 각각의 청음기 쪽으로는 길이가 25m 인 통신용 광섬유 케이블(fiber-optic cable)을 이용하였다. 광케이블

를 사이에는 슬리브형 콘넥터(connector)를 사용하였으며 이것의 접촉면에는 index matching oil 을 도포하여 굴절을 차이에 의한 광손실을 최소화 하였다.

시분할 다중방식을 이용한 2 채널 센서 불평형 간섭계 배열의 실체를 Fig. 3 에 보였다. 여기서 방향성 결합기의 음향 차단효과를 극대화 하기 위하여 차단막 장치를 고안 하였으며 지상에 노출된 광케이블은 음향에 의한 간섭을 최소화 하였다.

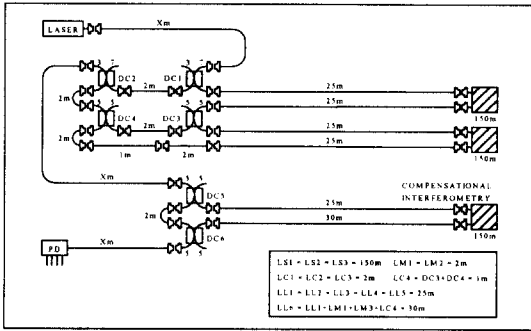


Fig. 2 Fiber optic cable connection in sensor array



Fig. 3 Photograph of the unbalanced fiber-optic interferometer for the array system

광원은 파장이 1319nm 인 Lightwave 사의 모델 125-1319-100 diode pumped Nd-YAG CW 레이저를 사용하였으며 최대출력은 100mW 이다. 레이저 헤드에는 반도체 레이저 다이오드, NPRO(Non-

Planar Ring Resonator), 고립기(Isolator) 및 광섬유 coupling 결합기 등이 포함되어 있다. 출력은 Fujikura 편광유지 광섬유에 결합되고 광섬유의 끝단은 FC/PC connector 로 처리 되었다.

광펄스 발생기는 광-음향 변조기(AOM, Acousto-Optic Modulator)와 구동 드라이버, 펄스 발생기를 사용하여 발생 시켰는데 AOM 은 ISOMET 사의 model 1206C 이고 구동 드라이버는 model 223A-1 디지털 드라이버, HP8131A 펄스 발생기를 사용하였다. AOM 의 중심 주파수는 110MHz 이고 양끝단에 4축 manipulator 가 있어 입력광과 출력광의 광섬유 결합 각도를 조정할 수 있게 되어 있다.

간섭계에 펄스폭 20ns 의 짧은 광펄스를 입사하여 HP54542C 의 디지털 오실로스코프로 펄스의 분리 간격을 측정하여 광경로차를 계산한 결과 첫번째 감지센서 간섭계는 107.03m, 두번째 감지센서 간섭계는 99.73m, 보상 간섭계는 102.97m 이었다. 감지 간섭계와 보상 간섭계 사이에 광경로차가 존재하나 이는 광원으로 사용한 Nd-YAG 레이저의 가간섭 길이가 10km 이상 이므로 불일치로 인한 위상잡음은 상당히 작다고 볼 수 있다.

신호처리를 위한 변조신호와 모의 음향신호를 발생 시키기 위한 위상 변조기는 PZT 에 광섬유를 감아서 사용하였고 간섭 펄스가 최대의 가시성을 갖게하기 위하여 Fiber-Pro 의 고리형 광섬유 편광조절기(Polarization Controller)를 사용 하였다. 보상간섭계는 주위 환경잡음의 영향을 최소화 하도록 음향 차폐상자로 제작 하였다.

광 검출기는 New Focus 사의 High-Speed Photoreceiver 모델 1811 과 EPITAXX 사의 PIN-Transimpedance Amp. 모델 ERM 531 을 사용 하였다. 1811 은 AC coupled 형이며 InGaAs PIN Photodiode 를 사용하며 반응도는 1300nm 부근에서 약 0.8(A/W)이다. 상승시간은 3ns 이고 전류이득은 40V/mA(AC), 최대 입력광

전력은 선형 동작범위 내에서 $53 \mu\text{W} (@ 1300\text{nm})$ 이다. ERM531은 GaAs Transimpedance Amp.와 같이 집적된 형태로 이득은 약 18V/mW 이고 최대 입력 광전력은 2mW 정도이다.

4. 배열 음향 실험 및 결과

불평형 간섭계를 이용한 광섬유 수중음향 청음기 배열의 음향 감지 성능을 확인하기 위하여 Fig. 4와 같이 실험 장치를 구성하고 음향 수조에서 실험하였다. 음향수조는 길이, 폭 및 깊이가 각각 18m, 10m, 10m이며 정채파를 제거하기 위하여 약간 찌그러진 형상이며 음향 수조속은 청수로 채워져 있다. 음원으로는 Flextensional 형 저주파 음원기(model: BAeSEMA GRP 1500Hz Flextensional Transducer)를 사용하였고 이것은 주파수 대역 $2\text{kHz} \sim 4.5\text{kHz}$ 에서 평탄한 특성을 가지고 있다. 음원은 함수 발생기(SRS DS345)로 일정한 주파수 및 진폭으로 구동하였다.

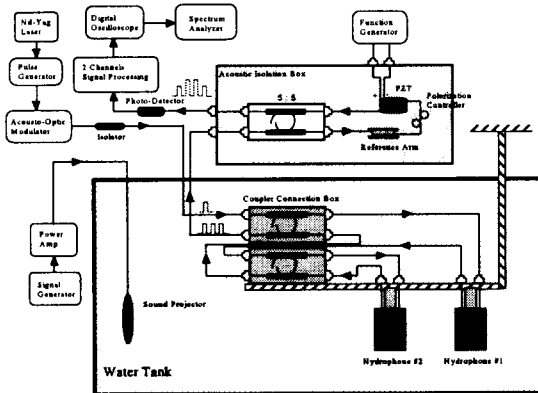


Fig. 4 Experimental set-up of fiber-optic hydrophone array for the sound detection

실험은 먼저 음원 및 광섬유 청음기 배열을 음향 수조에 담근후 레이저를 광섬유 간섭계에 입사 시킨다. 펄스 발생기를 통하여 폭이 370ns, 발생을 500kHz로 펄스를 AOM 구동기에 인가

하여 AOM을 통과한 빛이 펄스화 되어 불평형 간섭계에 입사 되도록 하였다. 하나의 입력 광펄스가 첫번째와 두번째 청음기를 통과하고 나면 세개의 광펄스로 된다. 수중에서의 음압이 광섬유 청음기에 도달하면 광섬유 자체에 길이 변화를 일으켜 결국 광 위상차로 검출이 된다. 신호처리 기법은 Fig. 5와 같은 개념인 Synthetic Heterodyne 기법을 사용하였다.

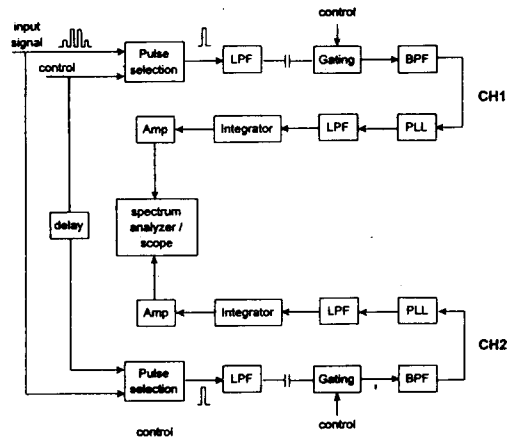


Fig. 5 Concept of the Signal Processing Unit

본 실험에서는 저주파 음원에서 2kHz의 싸인파(sin wave) 음향 신호를 수중에서 발생 시키게 하고 배열을 통한 감지 센서부인 청음기의 음향 감지 특성을 보았다. Fig. 6은 대역 통과 필터(Band-Pass Filter)를 거친 음향 신호를 보인 것이다. 그림에서 위쪽은 첫번째 센서(#1) 출력이며 아래쪽은 두번째 센서(#2) 출력을 보인 것이다. 본 실험을 통하여 불평형 간섭계를 이용한 광섬유 청음기 배열의 음향신호 감지 특성이 매우 안정적임을 확인 하였으며 이는 배열의 갯수 즉, 채널의 갯수를 계속 늘려도 같은 결과를 얻을 것임을 예상할 수 있다.

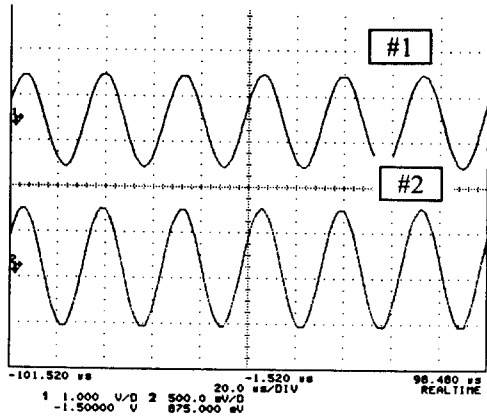


Fig. 6 Output Acoustic Signal of the Two Hydrophones after Band Pass Filter

5. 결론

본 연구에서는 불평형 간섭계를 이용한 광섬유 수중 음향 청음기 배열의 음향 감지 성능을 확인하기 위하여 2개의 청음기를 배열로 장착을 하고 TDM 방식을 이용한 신호처리 기법으로 음향 감지 특성을 실험으로 보았다. 본 실험에서는 불평형 간섭계형과 TDM 방식의 신호처리가 배열의 효율성을 높이고 안정적인 음향 신호를 감지하는 특성이 있음을 확인 하였다. 위상 잡음을 포함한 신호의 잡음이 원하는 신호펄스로 전이되지 않도록 하고 광검출기의 커플링과 스위칭 회로의 개선을 통하여 시스템의 성능이 보다 향상 될 수 있다고 판단 된다. 그러나 청음기의 감도는 그 자체의 성능개선과 함께 신호처리 회로의 성능에 민감하게 반응하므로 신호처리상의 잡음제거를 통한 감도 향상 연구가 진행되어져야 한다고 본다.

참고문헌

1. 이종길, 윤형규, 서인창, 1996, "광섬유 하이드로폰 및 소나 기술 현황," 국방과 기술, 제205호, pp. 48-61.
2. 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.
3. McMahon, G. W. and Cielo, P. G., 1979, "Fiber Optic Hydrophone Sensitivity for Different Sensor Configurations," *Applied Optics*, Vol. 18, No. 22, pp. 3720-3722.
4. 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.
5. 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.
6. Brown, D. A., Hofler, T., and Garrett, "High-Sensitivity, Fiber-Optic, Flexural Disk Hydrophone with Reduced Acceleration Response," *Fiber and Integrated Optics*, Vol. 8, 1989, pp. 169-191.
7. Bucaro, J. A. Dardy, H. D., "Fiber-Optic Hydrophone," *Journal of Acoustical Society of America*, **62**(5), 1977, pp. 1302-1304.
8. Bucaro, J. A., Houston, B. H., and Williams, E. G., "Fiber-Optic Air-Backed Hydrophone Transduction Mechanisms," *Journal of Acoustical Society of America*, **89**(1), 1991, pp. 451-453.
9. Cole, J. H. and Bucaro, J. A., "Measured Noise Levels for a Laboratory Fiber Interferometric Hydrophone," *Journal of Acoustical Society of America*, **67**(6), 1980, pp. 2108-2109.
10. Dakin, J. P. and Wade, C. A., "Optical Fibre Hydrophone Array-Recent Progress," *SPIE 514*, 1984, pp. 375-379.