

휴대용 수중청음기 배열 시스템의 개발

Development of a Portable Hydrophone Array System

김 봉 채*
(Bong-Chae Kim*)

*한국해양연구원 해양환경연구본부

(접수일자: 2006년 3월 22일; 수정일자: 2006년 5월 10일; 채택일자: 2006년 5월 18일)

수중음장의 공간적인 분포를 측정하거나 해양에서 음파의 도래방향을 탐지하기 위하여 수중청음기 배열을 사용하고 있다. 그런데 수중청음기 배열은 일반적으로 규모가 크고 가격도 고가이다. 그래서 수중청음기 배열을 다루기가 편리하지 못하고, 구입하기도 쉽지 않다. 수중청음기 배열을 간편하게 구성하여 수중음파를 수신하는 데 사용할 목적으로 수중청음기와 데이터 로거가 일체형인 수중청음기 로거를 개발하였다. 그리고 수중청음기 로거로 구성된 수중청음기 배열 시스템을 개발하였다. 이 논문에서는 개발된 수중청음기 로거 및 수중청음기 배열 시스템의 구성에 대하여 보고한다. 또한 수중청음기 로거의 구조실험 결과 및 수중청음기 배열 시스템에 의한 해수중 주위잡음의 측정 예에 대하여 고찰한다. 그리고 이 수중청음기 배열 시스템을 사용할 때 편리한 점에 대해 기술한다.

핵심용어: 수중청음기, 수중청음기 배열 시스템, 수중음향 측정

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

A hydrophone array is used to measure spatial distribution in underwater sound field and to detect incoming direction of sound waves in the ocean. It is not usually convenient to handle the hydrophone array because of its extensive scale. And it is not easy to purchase the hydrophone array because of expensive price. A hydrophone logger combined with a hydrophone and data logger was developed to consist conveniently of a hydrophone array for use to receive underwater sound waves. And a hydrophone array system with the hydrophone loggers was developed. Main configurations of the hydrophone logger and the hydrophone array system are introduced in this paper. Also we present some measurement results by the hydrophone logger in a water tank and measurement examples on ambient noise in the sea by the hydrophone array system. And we discuss some advantages in use of the hydrophone array system.

Keywords: Hydrophone, Hydrophone Array System, Underwater Acoustic Measurement

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.6)

I. 서론

수중청음기[1-3]는 수중에서 음파를 수신하여 전기신호를 출력하는 수중음향 분야의 기본적인 측정장비이다. 해양에서 수중음향 실험을 실시하는 경우, 음장의 공간적인 분포를 측정할 뿐만 아니라 수신된 음향신호를 처리함으로써 음파 도래방향을 파악하기 위하여 수중청음기 배열 시스템 (hydrophone array system)[4-6]을 사용하고 있다. 그리고 해양물리, 해양지질 및 해양생물 등의 파라미터를 측정하는 데 쓰이는 해양탐사용 수중음향 장비의 경우에도 음장의 공간적인 분포를 측정함으로

써 넓은 해역을 동시에 탐사할 목적으로 수중청음기 배열 시스템을 사용하고 있다.

수중청음기 배열 시스템에서는 여러 개의 수중청음기를 수심별로 배치하거나 또는 수평으로 간격을 두고 배치하여 각각의 채널에서 수중음파를 수신한 다음, 필터와 증폭기를 사용하여 필요로 하는 주파수 성분의 수신신호를 여과함과 동시에 증폭하고 나서, 이것을 테이프 또는 디스크에 기록한다. 그런데 종래의 수중청음기 배열 시스템에서는 수중청음기에 감지되는 음향신호의 전송매체로서 케이블을 이용하고 있다. 이러한 시스템에서는 케이블 길이에 의한 전송잡음과 전송손실을 가능한 줄이기 위하여 실드선 (shielded cable)을 사용하고 있으며, 가혹한 해양환경에서 케이블을 보호하기 위하여 보조 로프를 필요로 하고, 수중청음기에는 전치 증폭기

(pre-amplifier)를 갖추고 있는 경우가 대부분이다.

이러한 종래 수중청음기 배열 시스템의 가장 큰 단점은 채널수가 많아짐에 따라 케이블이 다중화되어 복잡해지고, 규모가 커지므로 무거워져서 다루기가 불편해지는데 있다. 또한 수중청음기의 위치는 각 채널의 케이블 길이를 정해지기 때문에 수중청음기의 간격을 원하는 대로 바꾸기 어렵고, 사용하는 도중에 케이블이 손상되는 경우 수리하는 데에 시간과 비용이 많이 드는 단점도 있다. 그리고 심해에서 사용할 때에는 수중청음기 케이블이 더욱 길어지므로 이러한 단점은 더욱 두드러지고 있다.

케이블 전송방식의 수중청음기 배열 시스템에 관한 문제점은 다중전송 케이블에 의한 것이므로 이에 대한 해결책은 음향신호를 유선으로 전송하지 않고 무선으로 전송하는 시스템을 고안하든지 또는 음향신호를 수신하여 자체적으로 기록하는 수중청음기 시스템을 개발하는 것이다. 특히 수중음향 신호를 수신하여 자체적으로 기록하는 수중청음기 로거로 수중청음기 배열을 구성하는 경우에는 각각의 채널에서 수중음향 신호 기록의 개시시각과 종료시각을 동기화시켜야 하므로 이것을 위한 트리거 제어신호를 발생하고 전달하는 장치가 필요하다.

종래에는 무선전송 장치나 자체 기록장치를 고안하더라도 사용이 가능한 전자부품들의 집적도가 그다지 높지 않아서 장치가 대단히 복잡해질 뿐만 아니라 많은 소비전력을 필요로 함에 따라 전원의 크기가 문제가 되어 실제로 현실화하기가 곤란하였다. 그러나 최근에는 대용량의 메모리를 비롯하여 고집적도의 저소비 전력 전자부품들이 다양하게 공급되어 있으므로 새로운 수중청음기 배열 시스템의 개발이 가능하게 되었다.

해양에서 수중음파 수신에 사용하기 위하여 채널별로 독립적인 증폭기와 필터, 기록장치 및 전원을 갖춘 수중청음기 로거 (hydrophone logger)를 새로이 고안하였고, 직접적인 전선의 연결이 없이 이것의 작동을 무선과 전자유도 방식으로 제어하는 시스템을 개발하였다. 여기에서는 새로이 개발된 수중청음기 로거 및 수중청음기 배열 시스템에 대하여 기술하고, 수신상태의 측정결과 및 실제 해수중 주위잡음 측정 예에 관하여 고찰한다.

II. 수중청음기 배열 시스템의 구성

2.1. 수중청음기 로거

수중청음기 로거의 기본적인 구성에 관한 블록 다이어

그램 (block diagram)을 그림 1에 나타내었고, 개발된 수중청음기 로거의 사진을 그림 2에 나타내었다. 그리고 수중청음기 로거의 주요한 사양을 표 1에 나타내었다.

그림 1에 나타낸 바와 같이 수중청음기 로거는 수중청음기, 필터와 증폭기, AD 변환기 (analog to digital converter)와 제어기를 갖춘 CPU (central processing unit), 메모리, 슬레이브 전자유도 커플러 (slave electromagnetic induction coupler), 변압기와 증폭기 및 전지로 구성되어 있다.

수중청음기 자체의 센서로는 캐나다의 센서 테크놀로지 회사 (Sensor Technology Limited)에서 시판하는 모델 SQ05[7]를 사용하였는데, 이것의 수신 전압감도는 1 Hz~6 kHz의 주파수 범위에서 -201.5 dB re 1 V/ μ Pa이며, 정전용량은 3,200 pF이다. 그리고 AD 변환기와 제어기로 구성된 CPU로는 캐나다의 시그널 테크놀로지스 회사 (Cygna! Technologies Corporation)에서 생산하는 모델 C8051F020을 사용하였다.

외부 전자유도 방식[8]에 따라 슬레이브 전자유도 커플러에 트리거를 위한 기동펄스가 인가되면, 변압기와 증폭기에서 이 신호를 증폭시켜 CPU로 보냄과 동시에

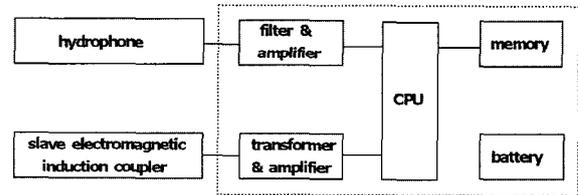


그림 1. 수중청음기 로거의 블록 다이어그램.
Fig. 1. Block diagram of a hydrophone logger.

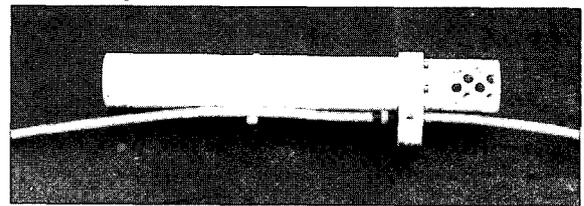


그림 2. 수중청음기 로거의 사진.
Fig. 2. Photograph of the hydrophone logger.

표 1. 수중청음기 로거의 주요 사양
Table 1. Main specifications of the hydrophone logger.

receiving sensitivity	-201.5 dB re 1 V/ μ Pa
frequency band	20~2,500 Hz or 20~5,000 Hz
digitizing frequency	5 kHz or 10 kHz
digitizing bit	14 bit
dynamic range	81 dB
tolerable maximum water depth	1,000 m
data record time	72 min or 36 min
data recording control method	external electromagnetic induction

CPU에서는 수중청음기의 작동을 개시하도록 하고 있다. 그러면 수중청음기에서는 음향신호를 수신하여 전기신호로 변환하게 되고, 이것을 필터와 증폭기에 20~5,000 Hz의 신호만을 통과시켜 적정한 신호의 크기가 되도록 증폭하고 있다. 그리고 나서 이 신호를 CPU의 제어기와 AD 변환기에서 14비트로 디지털화 (digitizing)하여 메모리에 기록하고 있다. 전체적인 증폭도는 30 dB 또는 40 dB 중에서 선택할 수 있도록 되어 있고, 디지털화 주파수도 5 kHz 또는 10 kHz 중에서 선택할 수 있도록 되어 있다. 그리고 외부 전자유도 방식에 따라 슬레이브 전자유도 커플러에 트리거를 위한 중단펄스가 인가되면, CPU에서는 바로 수중청음기의 작동을 종료시키도록 되어 있다. 디지털 수중청음기의 1회 연속 기록시간은 5 kHz로 디지털화하는 경우 약 72분이고, 10 kHz로 디지털화하는 경우 약 36분이다.

2.2. 수중청음기 배열 시스템

수중청음기 로거를 사용하여 수중청음기 배열을 구성하는 경우 각각의 수중청음기 로거에 대하여 측정개시 및 측정중단 시각을 제어하기 위한 트리거 장치의 블록 다이어그램을 그림 3에 나타내었고, 수중청음기 로거를 사용한 수중청음기 배열 시스템의 구성에 관한 모식도를 그림 4에 나타내었다.

그림 3에 나타낸 바와 같이 트리거 장치는 트리거 버튼 (trigger button), CPU, 전지 및 증폭기 등으로 구성되어 있다. 그리고 그림 4에 나타낸 바와 같이 수중청음기 로거를 사용하여 배열을 만드는 경우, 전체적인 시스템은 RF 송수신기 (radio frequency transceiver)와 트리거 장치가 내장된 부이, 트리거 케이블과 마스터 전자유도 커플러 (master electromagnetic induction coupler), 절연 케이블과 다수의 수중청음기 로거 및 웨이트 (weight) 등으로 구성된다.

트리거 장치는 트리거를 위한 기동펄스와 중단펄스를 출력한다. 사용자가 필요에 따라 트리거 버튼을 누르거나 또는 RF 신호에 의해 트리거 버튼을 작동시키면 CPU에

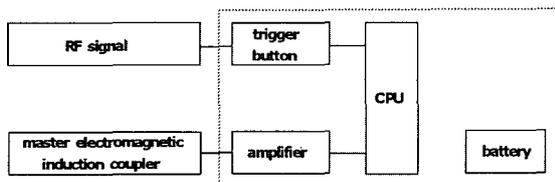


그림 3. 수중청음기 로거의 제어를 위한 트리거 장치의 블록 다이어그램.
Fig. 3. Block diagram of a trigger device for control of the hydrophone logger.

서 기동펄스 또는 중단펄스가 출력되고, 출력된 기동펄스 또는 중단펄스는 증폭기에서 증폭된 후 트리거 케이블을 통하여 마스터 전자유도 커플러에 인가된다 (그림 4).

수중청음기 로거를 제어하기 위한 전자유도 커플러의 모식도를 그림 5에 나타내었다. 전자유도 커플러는 페라이트 코어 (ferrite core)에 감긴 1차 및 2차 권선으로 이루어진 변압기이다. 마스터 전자유도 커플러의 경우 1차 권선은 실제로 n회 만큼 감은 코일이고, 2차 권선은 한 가닥의 절연 케이블과 이 양단에 접촉되는 해수로 구성되는 데, 해수는 도체이므로 1회 감은 권선과 동일한 기능을 한다. 즉, 마스터 전자유도 커플러의 2차측의 1회 권선은 절연 케이블, 상부 해수접촉부, 해수, 하부 해수 접촉부로 연결되는 루프를 형성한다. 마스터 전자유도 커플러의 1차측에 트리거 펄스가 인가되면, 권선수가 1회인 2차측에서는 그 1/n에 해당하는 전압이 유도된다.

한편 수중청음기 로거에 내장된 슬레이브 전자유도 커플러의 경우에는 1차측이 한 가닥의 절연 케이블과 이 양단에 접촉되는 해수로 구성된 1회 감은 권선이고, 2차측은 실제로 n회 만큼 감은 권선이다. 마스터 전자유도 커플러의 2차측과 슬레이브 전자유도 커플러의 1차측은

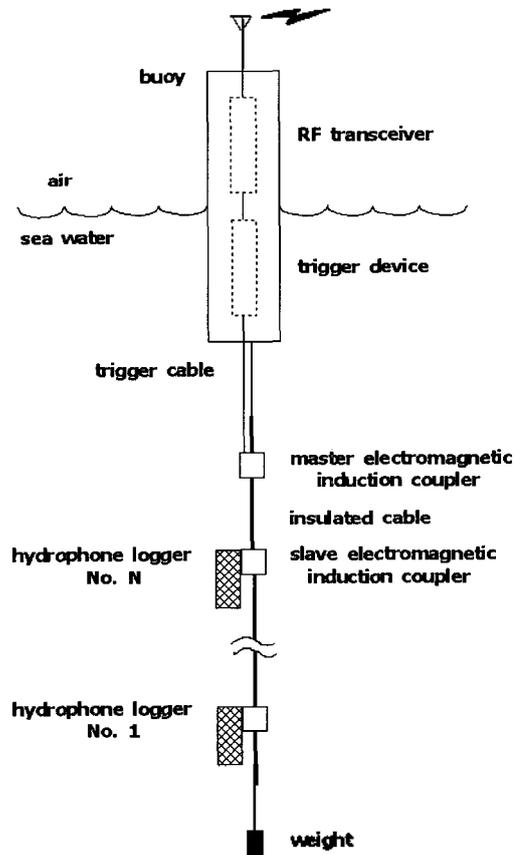


그림 4. 수중청음기 배열 시스템의 모식도.
Fig. 4. Schematic view of a hydrophone array system.

동일한 것이므로 마스터 전자유도 커플러의 2차측에 원래의 트리거 펄스의 1/n에 해당하는 전압이 인가되면, 슬레이브 전자유도 커플러의 2차측에는 원래의 트리거 펄스가 유도되어 수중청음기 로저의 기록이 개시된다.

그리고 기록종료의 경우에는 사용자가 트리거 버튼을 누르거나 또는 RF 신호에 의해 트리거 버튼을 작동시키면 CPU에서 중단펄스가 출력되고, 출력된 중단펄스는 증폭기에서 증폭된 후 트리거 케이블을 통하여 마스터 전자유도 커플러에 인가됨으로써 수중청음기 로저에 내장된 슬레이브 전자유도 커플러에 의해 중단펄스가 유도됨에 따라 수중청음기 로저의 기록이 종료된다. 따라서 사용자는 트리거 장치를 사용해 트리거를 위한 가동펄스를 출력하여 다수의 수중청음기 로저를 동기화시킨 상태에서 수신되는 수중음향 신호를 동시에 기록하도록 제어하고, 트리거를 위한 중단펄스를 출력하여 수중음향 신호의 기록을 동시에 중단시킨다.

그림 4에 나타낸 바와 같이 각각의 수중청음기 로저들은 한 가닥의 절연 케이블에 부착되어 채널 각각의 수중음향 신호를 수신하여 기록한다. 이 때에는 한 번의 무선 가동신호로 절연 케이블에 매달린 모든 수중청음기 로저들의 자료기록이 동시에 트리거되며, 무선 중단신호에 의하여 자료의 기록이 동시에 중단된다. 수중음향 자료의 기록이 종료되면, 수중청음기 로저를 회수한 후 수중청음기 로저에 기록된 디지털 수중음향 자료를 컴퓨터로 읽어 들여 컴퓨터의 저장장치에 저장한다. 그리고 나서 수중청음기 로저의 메모리를 비우면 수중청음기 로저를 반복하여 사용할 수 있다.

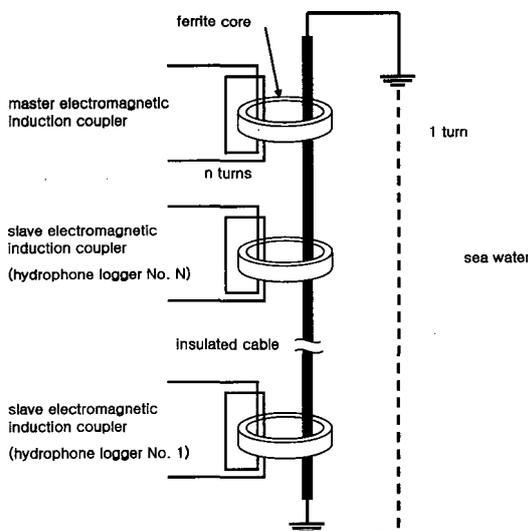


그림 5. 수중청음기 로저의 제어를 위한 전자유도 커플러의 모식도.
Fig. 5. Schematic view of the electromagnetic induction coupler for control of the hydrophone loggers.

이 시스템의 경우에는 수중청음기의 위치 또는 간격의 변경이 용이하며, 채널 수에 관계없이 케이블이 단지 한 가닥으로 구성되므로 시스템 전체의 제작비용이 저렴하게 된다. 그리고 종래의 수중청음기 배열 시스템은 수중청음기가 다중 케이블에 부착된 상태로 운반되는 데 비하여 새로이 개발된 이 시스템은 수중청음기와 절연 케이블을 분리할 수 있으므로 운반시에도 편리하고 수중청음기가 손상될 우려도 줄일 수 있다.

III. 측정결과 및 고찰

먼저, 실내 수조 (3 m x 4 m x 4 m)에서 수중청음기 로저의 수중음향 자료 기록상태를 확인함과 동시에 수중청음기 로저의 수신감도를 측정함으로써 수중청음기 로저의 수신감도와 수중청음기 센서 자체의 수신감도를 비교하기 위하여 수조실험을 실시하였다. 여기에서는 수중스피커 (underwater speaker)[9]를 음원으로 사용하여 수중에 펄스연속파 (pulsed continuous wave)를 발생하였고, 비교하기 위한 표준 수중청음기로는 브뤼엘 앤드 케아 (Bruel & Kjaer)의 모델 8103을 사용하였다.

수중청음기 로저의 수신감도 측정결과를 그림 6에 나타내었다. 여기에서는 표준 수중청음기 수신감도를 기준으로 비교 교정법[10-11]을 사용하여 수중청음기 로저의 수신감도를 구하였다. 수조실험 결과 개발된 수중청음기 로저는 양호하게 수중음향 자료를 기록하고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 수신감도를 측정한 결과 수중청음기 로저의 수신감도는 주파수 대역 100~630 Hz에서 약 -201.2 dB re 1 V/ μ Pa (표준편차 1.0 dB)이었고, 대체로 평탄하였다. 수중청음기 로저에 관한 이 수신감도는 수중청음기 센서 자체의 수신감도 (-201.5 dB re 1 V/ μ Pa)와

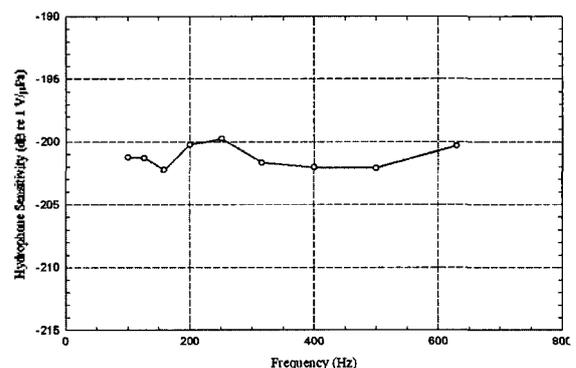


그림 6. 수중청음기 로저의 수신감도.
Fig. 6. Receiving sensitivity of the hydrophone logger.

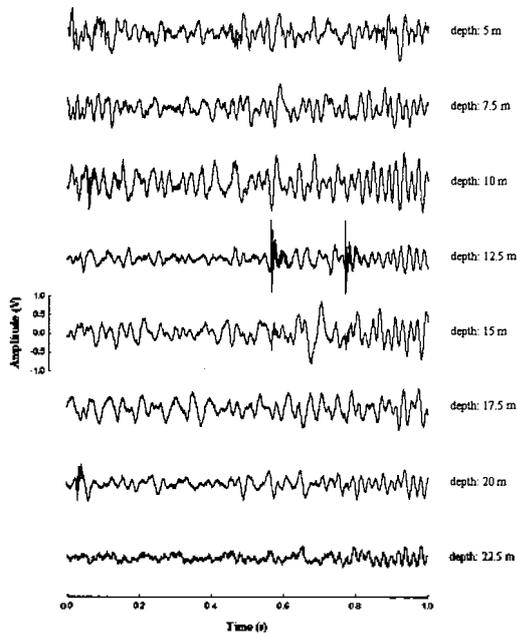


그림 7. 수중청음기 로거에 의해 측정된 해양잡음의 파형.
Fig. 7. Waveform of oceanic ambient noise measured by the hydrophone loggers.

거의 같은 값을 갖고 있었다. 따라서 수중청음기 센서를 수중청음기 로거의 부품으로 구성하였다 하더라도 수신감도는 거의 변하지 않았음을 확인할 수 있었다.

개발된 수중청음기 배열 시스템의 작동상태와 자료 기록상태 등을 확인하기 위하여 수중청음기 로거로 배열을 구성하여 해양에서 해수중 주위잡음을 측정하였다. 앞으로 고정시킨 조사선으로부터 약 100 m 정도 떨어지도록 수중청음기 로거 8개로 구성된 수중청음기 배열 시스템을 설치하였다. 이 때에는 파도에 의한 수중청음기의 상하운동을 최소화하기 위하여 세로로 긴 원통형 부이를 사용하였다. 직경과 길이가 각각 150 mm와 2 m인 PVC (polyvinyl chloride) 파이프 양끝을 밀봉하여 부이로 제작하였다. 이 원통형 부이의 내부에는 그림 4에 나타낸 바와 같이 RF 송수신기와 트리거 장치가 내장되어 있다.

개발된 수중청음기 배열 시스템의 실험역 실험은 6월 초순에 서해 평택항 입구의 수심 약 25 m 되는 정점에서 실시되었다. 이 때에는 모든 수중청음기 로거의 디지털 주파수와 증폭도를 각각 10 kHz와 40 dB로 설정하였으며, 무선 RF 신호를 사용하여 모든 수중청음기 로거에서 해수중 주위잡음 자료를 동시에 기록하도록 트리거하였고, 약 30분 동안 자료를 기록한 후 RF 신호를 사용하여 동시에 기록을 중단하도록 트리거하였다. 수중청음기 로거는 총 8개가 사용되었는데, 약 2.5 m의 간격으로 수심 약 5.0~22.5 m에 위치하도록 하였다. 해수중 주위잡음을 측정하는 동안 풍속은 2.5 m/s의 이하였다. 해수

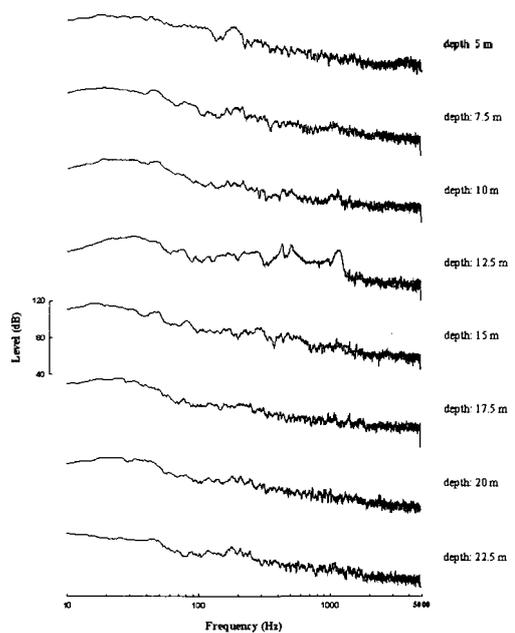


그림 8. 수중청음기 로거에 의해 측정된 해양잡음의 스펙트럼.
Fig. 8. Spectrum of oceanic ambient noise measured by the hydrophone loggers.

중 주위잡음 측정의 한 예로서 측정개시후 처음 1초 동안에 수신한 해수중 주위잡음의 파형을 그림 7에 나타내었고, 이것들의 스펙트럼을 그림 8에 나타내었다. 이들 그림에는 각각 수심 5.0 m, 7.5 m, 10.0 m, 12.5 m, 15.0 m, 17.5 m, 20.0 m 및 22.5 m에 위치한 8개의 수중청음기 로거로 측정한 해수중 주위잡음을 나타내고 있다. 전반적으로 해수중 주위잡음을 양호하게 수신하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 7에 의하면, 수심 15.0 m 이내의 경우 해수중 주위잡음이 비교적 크게 측정된 반면 수심 17.5~22.5 m에서는 수심이 증가함에 따라 해수중 주위잡음도 작아지고 있음을 보여주고 있다. 이러한 결과는 그림 8에 나타낸 스펙트럼에서도 잘 나타나 있다.

IV. 결론

수중음향 신호를 수신하여 그 자료를 자체적으로 기록할 수 있는 독립된 소형의 수중청음기 로거를 개발하였다. 개발된 수중청음기 로거에 대해 수조실험을 실시하여 작동상태를 조사함과 동시에 수신감도를 측정하였다. 그 결과 개발된 수중청음기 로거는 양호하게 수중음향 자료를 기록하였고, 수중청음기 로거의 수신감도는 수중청음기 센서 자체의 감도와 동일함을 확인할 수 있었다. 그리고 수중청음기 로거로 구성된 수중청음기 배열 시스템을 개발하였다. 개발된 수중청음기 배열 시스

탐을 개발하였다. 개발된 수중청음기 배열 시스템의 작동상태와 수중음향 자료 기록상태를 확인하기 위해 이 시스템을 해수중 주위잡음의 측정에 사용하였다. 그 결과 개발된 수중청음기 배열 시스템은 양호하게 작동하였고, 믿을만한 수중음향 자료를 획득할 수 있게 하였다. 특히 이것은 전원 케이블 또는 신호 케이블이 전혀 필요하지 않으므로 전원잡음 등 잡음에 매우 뛰어났으며, 절연 케이블에 매달아 사용하므로 취급이 간편할 뿐만 아니라 위치 수심과 수중청음기의 간격을 자유로이 조절할 수 있기 때문에 배열을 구성하는 경우 매우 편리하였다. 앞으로 디지털이징 주파수를 높이고 메모리의 용량을 증가시키도록 수중청음기 로거를 개량하여 실제의 해양음향 실험에서 적극적으로 활용할 예정이다.

감사의 글

본 연구의 일부는 한국해양연구원 2004년도 연구정책 및 지원사업으로 이루어진 것입니다. 장치제작 및 실험에 도움을 준 AAT의 박경수박사, 한국해양연구원 최복경박사 및 성균관대학교 대학원 박사과정 김병남학생에게 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. J. W. Caruthers, *Fundamentals of Marine Acoustics* (Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1977), pp.37~55.
2. W. S. Burdic, *Underwater Acoustic System Analysis* (Prentice Hall, New Jersey, 1991), pp.57~90.
3. <http://www.pmel.noaa.gov/vents/acoustics/haru-models.html>
4. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound* (Peninsula Publishing, Los Altos, 1983), pp.31~70.
5. A. D. Waite, *Sonar for Practising Engineers* (John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2002), pp.13~41.
6. <http://www.cmtec.com/dataacquisition/seacal.htm>
7. <http://www.sensortech.ca/>
8. Bong-Chae Kim, Kyung-Soo Bahk, Bok Kyoung Choi, and Cheolsoo Kim, "Development of a self-recording hydrophone," *Proceedings of the 18th International Conference on Acoustics*, III-2135~III-2136, 2004.
9. 이재봉, 김천덕, "어류의 유집과 구집용 수중스피커 개발에 관한 연구," *한국음향학회지* 25(1), 7~13, 2006.
10. R. J. Bobber, *Underwater Electroacoustics Measurements* (Peninsula Publishing, Los Altos, 1988), pp.18~26.
11. 海洋音響學會, *海洋音響の基礎と應用* (成山堂書店, 東京, 2004), pp.143~149.

저자 약력

• 김 봉 채 (Bong-Chae Kim)



1977년 2월: 부산수산대학 어업학과 (수산학사)
 1985년 3월: 일본 토카이대학 대학원 해양공학과 석사과정 (공학석사)
 1988년 3월: 일본 토카이대학 대학원 해양공학과 박사과정 (공학박사)
 1990년 5월~1996년 2월: 한국해양연구원 해양물리 연구부 선임연구원
 1996년 3월~현재: 한국해양연구원 해양환경연구본부 책임연구원

*주 관심분야: 해수중 음파전파, 해수중 주위잡음, 해양음향 토모그래피