

## 주파수 대역별 수중 순간소음 음원준위 산출 기법

### A Calculation Method of Source Level of Underwater Transient Noise by Frequency Band

최재용\*      오준석\*      이필호\*  
 Jae-Yong Choi      Jun-Seok Oh      Phil-Ho Lee

#### Abstract

This paper describes a calculation method of source level of a ship transient noise, which is one of the important elements for the ship detection. Aim of transient noise measurements is to evaluate of acoustic energy due to singular occurrence, which is therefore defined as non-periodic and short termed events like an attack periscope, a rudder and a torpedo door. In generally, in the case of randomly spaced impulse, the spectrum becomes a broadband random noise with no distinctive pattern. Therefore, frequency analysis is not particularly revealing for type of signal. In the paper, it is performed in time domain to analyze a transient noise. However, a source level of transient noise is required an investigation for multiple frequency band. So, in order to calculate a source level of transient noise, a design of exponential weighting function, convolution, band pass filtering, peak detection, root mean square, and parameter compensation are applied. The effectiveness of this calculation scheme is studied through computer simulations and a sea test. Furthermore, an application of the method is applied in a real case.

Keywords : Transient Noise(순간소음), Underwater Radiated Noise(수중방사소음), Exponential Weighting Function(지수가중치 함수), Frequency Band(주파수 대역), Root Mean Square(실효값)

#### 1. 서론

현재 해군의 수중함 비중이 증대되면서 해군의 수상 및 수중작전 수행과정에서 음향학적 작전 비중이 급격하게 증대하고 있다<sup>1,2)</sup>.

음향학적 작전은 함정의 수중소음에 대한 정확한 정보에 근거하여 수행되며, 이러한 정보는 함정 수중방사소음 측정을 통해 제공된다. 따라서 함정 수중방사소음 측정은 함정의 탐지, 식별 및 피탐 위험도 평가 자료 제공을 위한 필수적인 수단이다. 일반적인 함정 탐지 및 식별 요소는 프로펠러, 감속기, 보조 기계류 등의 연속적인 가동 장비들이 포함되지만, 오늘날 함정 건조 및 정숙화 기술의 발달이 가속화 되면서 이러한 탐지 및 식별 요소를 도출하기가 점점 어려워

† 2010년 4월 23일 접수~2010년 7월 23일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 최재용(cjy680@add.re.kr)

지고 있다. 이에 반해, 잠수함의 탐색 및 공격 잠망경, 어뢰발사관 개폐, 기동경로를 조정하는 타기와 같은 장비들은 짧은 시간동안 작동하면서 임펄스성 소음을 발생하는데, 이를 순간소음이라 한다. 이러한 순간소음은 함정 정속화 추세에 대응하여 탐지 요소로서의 비중이 높아지고 있다.

순간소음은 짧은 시간동안(수초에서 수십초 사이) 발생하며, 주파수 영역에서 특정 토널 성분을 가지는 것이 아니라 소음의 에너지 성분이 넓은 대역에 걸쳐 분포한다. 따라서 순간소음을 평가하기 위해서는 특정 대역별로 에너지 분석을 수행한다.

본 연구는 함정에서 발생하는 순간소음의 주파수 대역별 음원준위 산출 방법을 기술한다. 이는 짧은 시간동안 측정된 순간소음에 대해 저주파 필터를 적용한 후 설계된 지수 가중치 함수와 서로 컨볼루션(Convolution)을 취하고, 이를 다중 대역 통과 필터(Multiple Bandpass Filter)를 적용하여 각 대역별 침묵값에 대한 실효치를 구하여 순간소음 음원준위를 산출한다.

본 논문의 구성은 2장에서 순간소음의 특성 및 측정 방법에 대해 설명하고 3장에서는 주파수 대역별 순간소음 음원준위 산출 방법을 제안하며, 4장에서 실험결과를 기술하고 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 순간소음의 특성 및 측정

일반적으로 주파수 분석은 반복적이며 정상파와 같은 주기적인 신호에 적용한다. 이는 특별한 주파수 및 하모닉 정보를 제공해 주기 때문이다<sup>[3]</sup>. 또한 음원준위 산출을 위해 다음과 같은 실효치(Root Mean Square)를 적용한다.

$$Y_{rms} = \sqrt{\overline{p(t)_i^2}} \quad (1)$$

그러나 순간소음은 짧은 시간동안 발생하는 비주기적이며 랜덤한 임펄스성 신호들이다. 식 (2)와 같이 Delta Dirac 함수에 의해 표현되는 순간소음의 경우,  $t = t'$ 에서 1이지만 긴 시간동안( $t > t'$ ) 식 (1)의 값은 0에 수렴한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(t') \delta_{\tau}(t-t') dt \quad (2)$$

따라서 신호의 길이를 예측할 수 없는 순간소음의 경우, 짧은 적분시간동안 음향학적 에너지의 실효치를 산출하기 위해서는 식 (1)보다는 지수 가중치 함수(Exponential Weighting Function)를 적용하여, 시간영역에서 순간소음 이벤트 발생시점에 대해 분석을 수행하는 것이 더 효율적이다<sup>[4,5]</sup>.

수중 순간소음 측정은 Fig. 1과 같이 함정이 정박된 상태에서 일정 거리에 수중청음기를 다수 설치하여 측정한다. 순간소음 측정은 배경소음이 설정된 기준 준위보다 낮은 외부 소음의 영향이 없는 조용한 곳에서 수행하여야 한다.

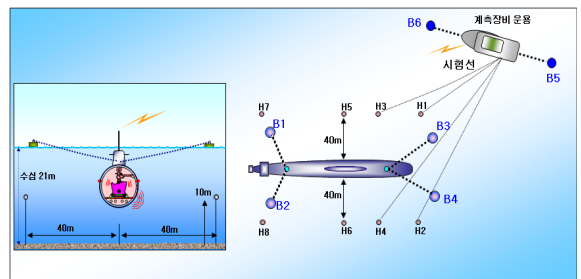


Fig. 1. 함정 순간소음 측정 개략도

순간소음 측정시 중요한 사항은 장비의 작동 시작과 종료에 대한 시간 정보를 측정소에서 정확히 알 수 있어야 한다. 이는 시험 수행시 트리거 신호(Trigger Signal) 발생 장치를 이용하여 함정에서 장비 작동 시작과 종료 시점에 트리거 신호를 전송하여 측정소에서 측정된 순간소음 데이터와 시간동기화 시킨다.

측정된 순간소음에 대한 음원준위 산출은 다음 단락에서 자세히 설명한다.

## 3. 순간소음 음원준위 산출 방법

앞에서 살펴 본 바와 같이 순간소음은 비주기적인 임펄스성 신호로 음원준위 산출은 시간영역에서 이벤트 발생시점에 대해 Fig. 2와 같은 절차로 수행한다.

### 가. 저주파 대역 필터

Fig. 1과 같이 수중청음기로부터 획득한 순간소음 신호( $P$ )에 대해 분석하고자 하는 주파수 대역( $0 \sim x$  kHz)까지 저주파 필터 및 데시메이션(Decimation)을 적용하여 순간소음 신호( $P_L$ )를 얻는다.

$$P_L = \{p_1, p_2, \dots, p_K\} \quad (3)$$

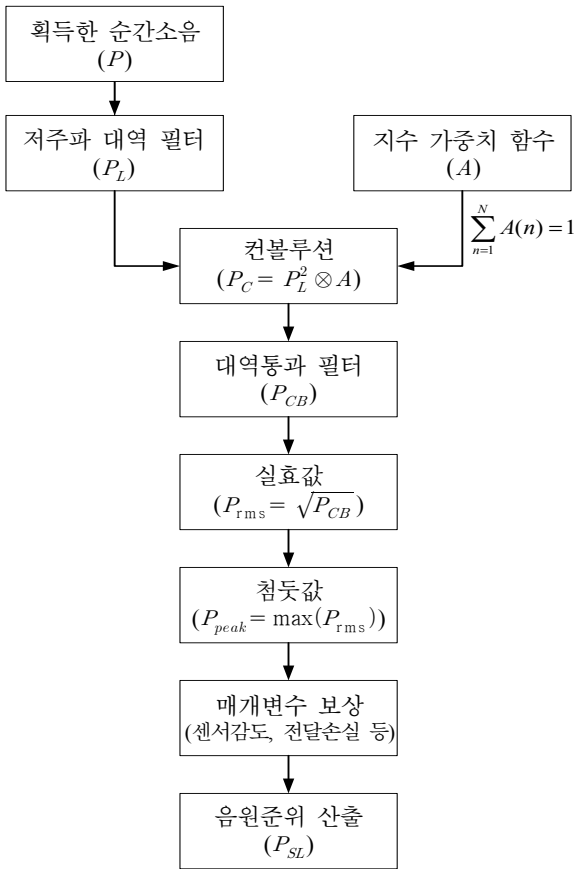


Fig. 2. 순간소음 음원준위 산출 흐름도

나. 지수 가중치 함수(Exponential Weighting Function)

단락 2에서 언급했듯이, 비주기적인 임펄스성 신호의 실효치를 얻기 위해 지수 가중치 함수(A)를 다음과 같이 설계한다.

$$A = B' \times C = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}, \sum_{n=1}^N A(n) = 1 \quad (4)$$

$$B' = e^{-\frac{(n-1)T}{\tau}} \quad \text{for } n = 1, 2, \dots, N$$

$$C = 1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}$$

여기서 T는 샘플링 시간(Sampling Time)이며, τ는 적분시간(Integration Time)이다. B'은 지수 가중치 함수

이며, C는 측정된 신호의 에너지 평가시 측정된 신호의 에너지보다 초과 추정되는 것을 방지하기 위해 적분시간과 샘플링 시간과의 관계로 정의된 별도의 가중치이다. 식 (4)에서 N의 값을 결정하기 위해 A의 합이 1이 되도록 한다.

다. 컨볼루션(Convolution)

설계된 지수 가중치 함수 A와 저주파 필터링 된 순간소음 신호 PL에 대해 다음과 같이 컨볼루션을 수행한다.

$$P_C = P_L^2 \otimes A \quad (5)$$

$$P_L^2 = \{p_1^2, p_2^2, \dots, p_K^2\}$$

식 (5)에서 PL<sup>2</sup>은 순간소음에 대해 실효값을 얻기 위해 PL의 각 항을 제공한다.

라. 다중 대역통과 필터(Multiple Bandpass Filter)

다중 대역통과 필터는 주파수 대역별 순간소음 음원준위를 분석하기 위함이다. 식 (5)를 통해 얻어진 데이터 PC에 대해 다중 대역통과 필터를 적용하여 각 대역별 데이터 PCB를 획득한다.

이는 M개의 B Hz 주파수 대역폭을 설정하여 수행하며, 순간소음 분석 조건에 따라 결정된다. M개의 대역에 대한 디지털 필터 설계는 실제 신호처리 샘플링 주파수 및 필터 설계 변수에 따라 달라지며, 필터는 버터워스(Butterworth), 체비셰프 II(Chebyscheff II) 등 여러 가지를 적용할 수 있다.

본 연구에서는 100Hz 대역폭을 가지는 20개 대역에 대해 수행한다.

마. 실효값 및 침닷값

대역통과 필터를 거친 M개 대역의 순간소음 신호 PCB에 대해 다음과 같이 root를 취함으로써 각 대역별 실효값을 얻을 수 있다.

$$P_{rms} = \sqrt{P_{CB}} \quad (6)$$

또한 식 (6)의 실효값으로부터 각 대역별 최댓값을 획득하여 침닷값을 구한다.

$$P_{peak} = \max(P_{rms}) \quad (7)$$

바. 매개변수 보상

매개변수 보상은 음원준위 산출을 위해 측정된 순간소음 데이터에 적용된 모든 이득 또는 감쇄 값을 보상한다. 수중 순간소음을 측정하기 위해 적용되는 매개변수는 수중청음기 수신감도(Receiving Sensitivity), 증폭기 이득(Amp Gain) 및 전달손실(Propagation Loss) 등이다.

사. 음원준위(Source Level)

주파수 대역별 순간소음 음원준위 산출은 식 (8)과 같이 식 (7)에 의해 얻어진 침묵값을 dB 단위로 환산하여 매개변수 보상값을 가감하여 구한다.

$$P_{SL, i} = L_{w, i} - L_{sens} - L_{amp} + L_{tl} \quad (8)$$

여기서  $P_{SL, i}$ 는  $i$ 번째 대역의 보상된 순간소음 음원준위이고  $L_{w, i}$ 은 식 (7)에 의해 얻어진 침묵값 준위이며,  $L_{sens}$ 는 청음기 수신감도이다.  $L_{amp}$ 는 증폭기 이득이며,  $L_{tl}$ 은 전달손실 준위이다.

전달손실 보상은 시험해역에 따라 달리 적용되며, 일반적으로 함정 시험평가를 위한 순간소음 측정은 천해 해역에서 수행함으로 덕트형 손실(Ducted Spreading Loss)을 적용한다<sup>[6]</sup>.

$$L_{tl} = 10 \times \log \frac{2\pi RD}{4\pi} \quad (9)$$

여기서  $R$ 은 음파 전달거리이고  $D$ 는 수심을 나타낸다.

4. 실험 및 고찰

제안된 순간소음 음원준위 산출 방법에 대한 검증을 위해 먼저 컴퓨터 모의 시뮬레이션을 통하여 기법에 대한 타당성을 살펴 본 후, 해상실험을 수행하였다.

가. 모의실험

단락 3에서 제시된 순간소음 음원준위 산출 기법에 대한 모의실험을 수행하기 위해 Table 1과 같이 순간소음을 설정하여 수행하였다.

Table 1. 모의실험 조건

구분	샘플링 시간	순간소음 발생 시간	적분시간 ( $\tau$ )	획득한 순간소음 ( $v$ )
실험 1	0.01s	0.01s	0.01s	1
실험 2	0.01s	0.07s	0.01s	1

실험 1은 샘플링 시간 0.01s로서 저주파 필터링 된 순간소음  $P_L$ 은 한 샘플만 1v의 값을 가진 신호로서 실효값을 구하면 Fig. 3과 같다.

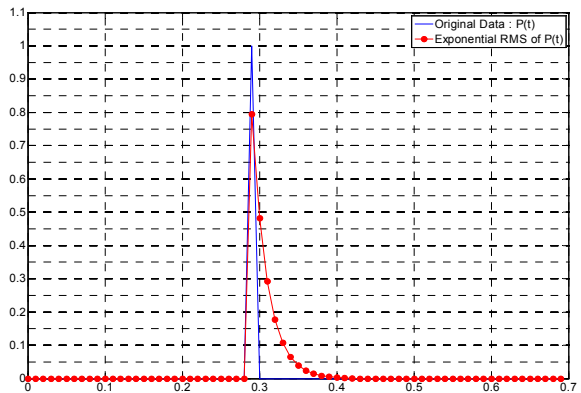


Fig. 3. 실험 1에 대한 순간소음 실효값

Fig. 3에서 획득된 순간소음 준위 1v에 대해 지수가중치 함수를 적용하여 계산된 실효값의 침묵값은 0.7951v이다.

실험 2는 발생한 순간소음이 7샘플 동안 1v 값을 가지도록 설정하여 실효값을 구하였다.

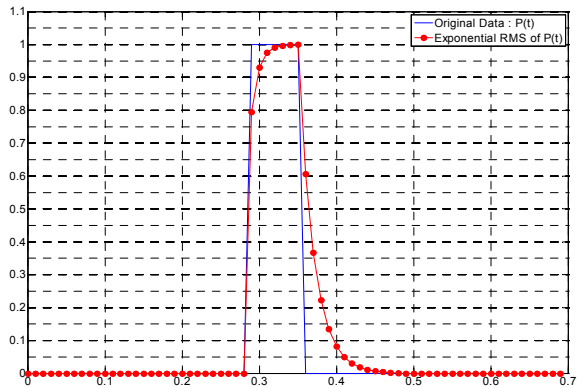


Fig. 4. 실험 2에 대한 순간소음 실효값

Fig. 4에서는 계산된 실효값의 침묵값이 0.995v이다. 실험 1과 실험 2는 획득한 순간소음의 크기가 동일하지만 펄스폭의 차이로 인하여 지수 가중치 함수를 적용한 실효값의 침묵값이 서로 다르게 나타나고 있다. 만약 실험 2보다 더 많은 샘플값이 1v이면 지수 가중치 함수에 의한 실효값의 침묵값은 1에 수렴할 것이며, 식 (1)과 동일한 결과를 얻게 된다.

가. 해상실험

해상실험은 Fig. 5와 같이 함정에 장착된 장비와 유사한 순간소음 발생 장치를 이용하여 소음원과 센서 간의 거리를 40m로 설정하고, 장비 작동구간 시간동기화 장치를 연동하여 실험을 수행하였다.

측정 장비의 샘플링 주파수는 8kHz이고, 적분시간 ( $\tau$ )은 0.01s, 주파수 대역폭 개수는 20개로 대역폭은 각각 100Hz이다.

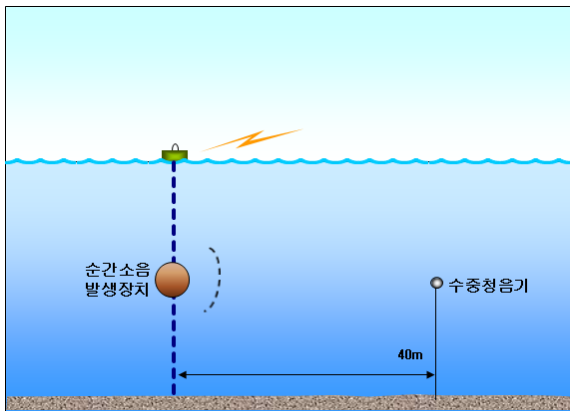
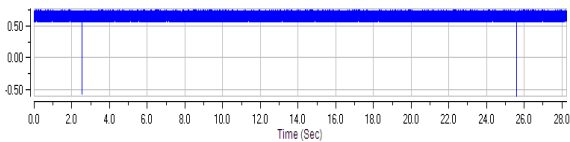
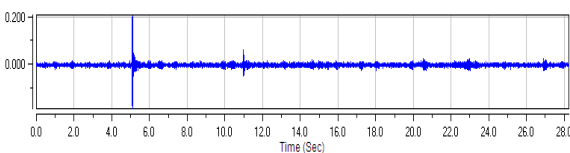


Fig. 5. 해상실험 개념도



(a)



(b)

Fig. 6. 수중청음기에 측정된 순간소음

Fig. 6(a)는 장비가 작동한 구간을 표시하며, 2.55s에서 장비 작동이 시작되어 25.6s에 장비가 작동이 종료되었다. Fig. 6(b)는 소음 발생장치로부터 발생한 순간소음을 수중청음기에서 측정된 결과이다.

Fig. 6(a)을 기준으로 Fig. 6(b)의 순간소음에 대해 대역별 음원준위를 산출하면 Fig. 7과 같다.

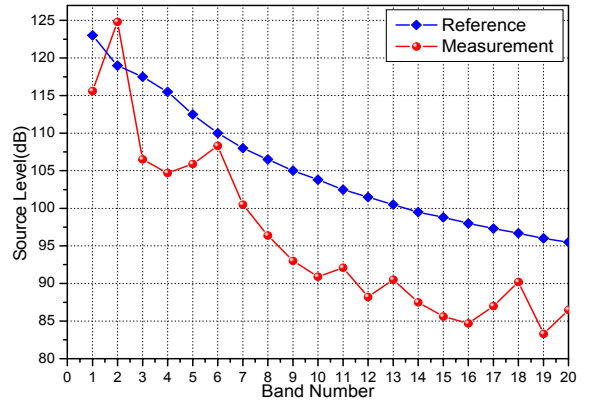


Fig. 7. 해상실험 순간소음 음원준위 결과

Fig. 7은 순간소음 평가 대역에 대한 기준 음원준위 값과 측정된 신호의 음원준위 값을 비교해 보여주고 있으며, 2번째 대역에서 측정된 음원준위 값을 초과하여 나타나고 있다.

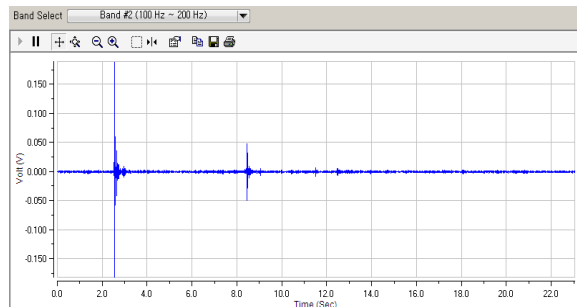
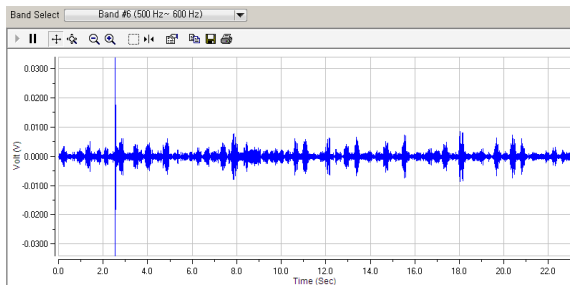


Fig. 8. 대역 2의 필터링된 시간영역 신호

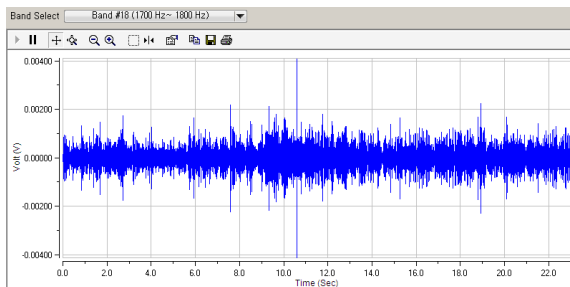
Fig. 8은 2번째 대역의 순간소음 신호로 침묵값은 장비가 작동한 후 약 2.6s에서 발생하고 있으며, 이 신호가 기준초과의 원인이다. 그러면 대역 6과 대역 18에서 기여하고 있는 소음을 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 9(a)는 대역 6의 시간영역 신호로 대역 2와 같은 시점에서 발생한 소음이며, Fig. 9(b)의 대역 18은 순간소음 침묵값이 약 10.6s에서 발생하고 있으며, 이

는 대역 2, 6과는 다르게 나타나고 있다. 이는 순간소음이 모든 주파수 대역에서 동일한 크기를 가지는 이상적인 백색잡음의 특성을 가지는 것이 아니라, 주파수별로 크기가 다른 신호들로 합성되어 있기 때문이다. 그러므로 Fig. 8과 Fig. 9(a)의 2.6s에서 나타나는 신호의 크기가 서로 다르며, Fig. 9(b) 대역에서는 2.6s 및 8.5s에서 발생한 신호가 나타나지 않는 대신에 약 10.6s에서 발생한 미약한 신호에 의해 영향을 받는다. 만약 이러한 순간소음이 함정 장비에서 발생한다면 순간소음 음원준위를 분석한 후, 소음 정속화가 요구 되면 소음 발생시점 분석을 통해 장비에 대한 보완 조치가 가능할 것이다.



(a)



(b)

Fig. 9. 대역 6과 18의 필터링된 시간영역 신호

## 5. 결론

본 연구는 함정에서 발생하는 수중 순간소음에 대해 주파수 대역별 음원준위 산출 방법을 제시하였다. 이는 측정된 순간소음에 지수 가중치 함수를 적용한 후, 다중 대역통과 필터를 이용하여 주파수 대역별 실효치 침묵값을 가지고 음원준위를 산출하였다. 본 연구의 순간소음 음원준위 분석은 모의실험 및 해상실험을 통하여 유효성을 확인하였으며, 실제 함정에서 발생하는 순간소음 시험평가에 적용하였다.

## Reference

- [1] D. Long, B. Rafine, "Trends in Acoustic Range Design due to Improved Science of Submarine", Conference Proceedings of Undersea Defence Technology, Paris, pp. 657~670, April 1991.
- [2] Naval Studies Board, Overview of Future Submarine Platform Technology, Technology for the United States Navy and Marine Corps 2000-2035 : Becoming a 21st Century Force, Vol. 6, Naval Academy Press, 1999.
- [3] Angelo, M., "Vibration Monitoring of Machines", Brüel & Kjær Technical Review, No. 1, 1987.
- [4] Temme, S. F., "Are You Shipping Defective Loudspeakers to Your Customers?", Listen, Inc. Application Note, Jan. 2000.
- [5] Brunet, P., Chakroff, E., and Temme, S. F., "Loose Particle Detection in Loudspeakers", presented at the AES 115th Convention, Oct. 2003.
- [6] Urick, R. J., Principles of Underwater Sound, 3rd ed., McGraw-Hill Inc., New York, 1983.