

수중음향학에 대한 소개

김 재 수

(한국해양대학교 조선해양공학부)

1. 머리 말

소음·진동 분야에서와 같이 수중음향학도 기존의 기계분야, 전자분야, 재료분야 등과 같은 범주로 나누려고 하면 쉽지가 않다. 즉, 수중음향학은 전통적인 물리학 분야인 음향학에 의존하여 현상을 설명할 수 있지만, 그 음향의 발생현상과 구현, 전달 현상, 그리고 신호처리 등은 각각 해양학, 전기전자분야의 신호처리와 그의 집적화된 회로에서의 구현, 센서기술 등과 같은 공학적인 기술에 기반을 두고 있는 복합된(inter-disciplinary) 분야라고 할 수 있다. 이러한 이유로 수중음향학을 부를 때 어느 분야에 비중을 두느냐에 따라 약간씩 다른 용어를 사용하고 있다.

해양음향(ocean acoustics)은 흔히 해양학자들이, 소나공학(sonar engineering)은 시스템적인 측면에서 공학자들이 즐겨 사용하는 용어로 여겨지며, 수중음향(underwater acoustics 또는 underwater sound)은 물리적인 현상에 비중을 두는 측면이 없지 않지만 많은 음향학자들이 사용하는 표준어로 정착되어가고 있다. 국내에서는 한국음향학회에 수중음향분과가 있으며 미국음향학회에서도 "Underwater Sound"를 하나의 분과로 다루고 있다.

본 원고에서는 다음과 같은 순서로 수중음향을 소개하고자 한다. 2장에서는 수중음향의 발전배경과 역사, 3장에서는 수중음향의 구성요소, 4장에서는 수중음향의 최근의 연구분야에 대해 논하고, 5장 맺음말에서는 요약하였다.

2. 수중음향의 발전배경과 역사

지상에서 레이더(RADAR, RAdio Detecting And Ranging)의 역할을 수중에서는 소나(SONAR, SOund NAVigation Ranging)가 대신한다. 이에 대한 이유는 해수중에서 전자기파의 감쇠가 크기 때문이다. 해수중에서 전자기파의 감쇠계수는 다음 식으로 표현된다.

$$\alpha_E = 3.45 \times 10^{-2} \sqrt{f}$$

여기에서, α_E 는 전자기파의 감쇠계수(dB/m)이고 f 는 주파수(Hz)이다. 반면, 해수중 음파의 경우에 감쇠계수는 그림 1에 나와 있는 바와 같고, 특히 5~40 kHz에 대해서 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다.

$$\alpha_A = 10.3 \times 10^{-3} f^2$$

여기에서, α_A 는 음파의 감쇠계수(dB/km)이고 f 는 주파수(kHz)이다. 위의 두 식에서 보는 바와 같이 지상에서 전자기파나 해수중의 음파는 주파수가 높아질수록 감쇠계수가 커진다. 국제전기통신조약 부속 무선통신규칙에 의한 구분을 따르면 3 kHz(VLF, Very Low Frequency)부터 300 GHz(EHF, Extreme High Frequency)까지의 주파수를 지상에서 통신에 사용하고 있다. 예를 들어, 전자기파중 상대적으로 감쇠가 적은 초저주파 영역의 10 kHz의 전자파는 3.45 dB/m의 감쇠를 받아 10m 진행하는 동안 평면 전자기파의 세기(intensity)는 약 1/2800로 약해진다. 반면, 해수중에서의 10

kHz 음파는 1 km 진행되는 동안에도 1.03 dB 만이 감소하여 음파의 세기는 약 79/100만큼의 감소만이 일어난다. 이러한 전자기파의 특성은 통신에 이용가능한 가시광선이나 레이저의 주파수 영역에서도 비슷한 경향을 보인다. 해수중에서 빛의 투과성은 계측기로는 3000m까지 빛의 입자가 감지된다고 하지만 사람의 시각으로 감지할 수 있는 거리는 우호적인 환경에서도 50m를 넘지 못한다. 적록레이저는 약 300m까지 검출이 가능하다고 알려져 있다. 따라서, 해수중에서는 전자파에 대해 상대적으로 낮은 전달손실로 인하여 음파가 수중에서의 탐지와 통신에 이용되기 시작하였다.

이러한 이유와 함께, 수중음향은 2번의 세계대전을 치르면서 해상권 장악을 위해 독일이 잠수함을 개발하면서 부터 직접적인 발전 계기가 마련되었다. 단계적으로는, 1차 세계대전 이전의 일반 통신에 사용되는 부품기술의 발전, 1차 대전 이후의 음향기술과 시스템 기술의 발전, 그리고 2차 대전과 그 이후의 정밀하고 절대적인 계측기술과 저소음 및 무반향(흡음) 기술의 발전으로 구별하여 생각할 수 있다. 이러한 군사기술은 주로 잠수함과 기뢰 등의 표적탐지와 어뢰 및 자항기뢰와 같은 무기체계에서 방사소음과 반향신호로부터 표적의 분류 및 운동분석과 같은 분야로 발전을 거듭하고 있다. 또한 산업 및 기초과학분야에서도 괄목할 만한 발전을 이루고 있다. 최근의 연구동향에 대해서는 4장에서 언급하기로 한다.

3. 수중음향의 구성요소

수중음향을 이용한 소나체계는 방법에 따라 수동소나와 능동소나로 나눌 수 있다. 수동소나는 음파를 송신하지 않고 수신만으로 해양환경이나 표적에 대한 정보를 얻는 소나시스템을 의미한다. 반면, 능동소나는 먼저 음파를 송신하여 표적이나 해양환경에서 산란 또는 반사되어 돌아오는 신호를 이용하는 방식이다. 지상에서 박쥐나 수중에서 돌고래가 표적에 대한 정보를 얻기 위해 음파를 송신하고 수신하는 것이 능동소나의 대표적인 경우이다. 이러한 능동소나의 경우에는 그림 1에 나와 있는 바와 같이, 음파는 신호발생기에서 송신신호가 발생되면 증폭기를 거쳐 음향변환기를 통해 해양환경으로 방사된다. 방사된 음파는 해양환경에서 전달되면서 굴절, 다중경로, 반사, 흡수 등을 통하여 표적에 입사된다. 표적에 입사된 음파는 표적에 의해 산란 또는 반사되거나 표적에 투과된 신호는 재방사를 통해 해양환경으로 음향에너지를 내보내게 된다. 이러한 신호는 다시 해양환경을 거쳐 수신기에서 전기적인 신호로 변환되어, 요구되는 정보를 얻기 위해 신호처리를 거치게 된다. 이처럼, 소나시스템은 그 구성요소 만 큼이나 다양한 분야를 내포하고 있다. 예를 들면, 송수신에 이용되는 소재로는 공기중과는 달리 물은 임피던스가 3750배 가량되어 주로 압전효과와 Magnetostrictive 현상과 같이 강력한 힘을 낼 수 있는 현상과 소재를

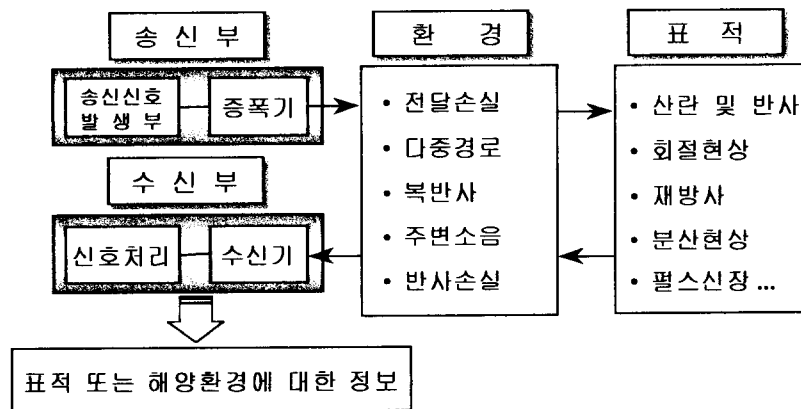


그림 1 수중음향 시스템의 구성요소

이용한다. 최근에는 수신기로서 광센서의 이용이 대두되고 있으며, 해양에서의 음향전달 현상을 규명하고 예측하기 위해 많은 음향학자들이 그의 모델링을 연구하고 있다. 소나신호처리분야는 고속처리 디지털 기술의 발달과 함께 최근에는 탐지방법, 방향추정, 표적분류 등에 끊임없는 연구가 이루어지고 있다. 표적에 의한 산란신호 또한 복잡한 물리현상 때문에 해석이 쉽지 않지만, 표적신호의 특성은 표적에 대한 자세각 및 분류 등의 역문제에 필수적이기 때문에 해석적, 수치적, 및 실험적인 방법이 활발하게 연구되고 있는 분야이다. 결국, 수중음향에 있어서의 요소기술은

- ① 센서기술
- ② 해양에서 음파의 전달현상 모델링
- ③ 소나신호처리 알고리즘 개발 및 고속화와 같이 요약될 수 있다.

4. 수중음향의 최근 연구분야

수중음향의 발전계기가 군사적인 면에서 마련되었듯이 수중음향분야는 아직도 군사적인 측면에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 2차 세계대전 이후에 산업전반에 대한 요소기술의 발달로 잠수함은 방사소음준위가 낮아지고 은닉성이 향상되었다. 따라서, 이를 탐지하기 위해서 탐지문턱(detection threshold) 음압준위에 영향을 주는 주변소음에 대한 연구가 소음원인과 해역별로 활기를 띄고 있다. 또한, 상대적으로 잠수함은 방사소음을 줄이기 위해 진동 및 소음감소 기술의 개발에 많은 연구비와 인력을 투입하고 있다. 최근의 소음감소 기법으로는 mass damper가 연구되고 있는데, 미해군에서는 소음감소 기법과 표적식별에 대한 연구의 일환으로 잠수함의 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{10}$ 비율의 모델을 만들어 호수에서 1000여개의 센서를 축소모형표적에 부착하거나 수중에서 청음기로 사용하여 실험을 수행하고 있다⁽¹⁾. 이러한 실험에서 얻어진 결과는 잠수함의 방사소음 제어와 능동소나 운용시에 탐지확률을 높이는 데에 이용될 뿐만 아니라 표적의 운동분석과 식별에도 사용될 수 있다.

수중음향을 이용한 기초과학분야로는 ATOC (Acoustic Thermometry of Ocean Climate)와 OAT (Ocean Acoustic

Tomography)가 활발히 연구되고 있다. ATOC는 수중에서의 음속이 수온에 의해 변화한다는 사실을 이용하여 해양에 저장된 열량과 주어진 거리사이에 음파가 도달하는데 걸린 시간의 변화량을 연관지어 해양에서의 온도변화를 관측하는 방법이다⁽²⁾. 예를 들면, 해양에서의 음속은 실험적으로 다음과 같이 표현된다.

$$c = 1449 + 4.6 T - 0.055 T^2 + 0.0003 T^3 + (1.39 - 0.012 T) \times (S - 35) + 0.017z$$

여기에서 c 는 음속(m/sec), T 는 수온($^{\circ}C$), S 는 염도(ppt), 그리고 z 는 깊이(m)를 각각 나타낸다. 온도변화에 대해 음속이 얼마나 변화하는지 알기 위해 온도에 관한 편미분을 취하면,

$$\frac{\partial c}{\partial T} = 4.6 - 0.11 T + 0.0009 T^2 - 0.012 (S - 35)$$

와 같기 때문에 염도 35ppt에 $4^{\circ}C$ 인 경우 해수의 온도가 $1^{\circ}C$ 변화하면 음속은 약 4.17 m/sec가 변화하게 된다. ATOC에서는 약 5,000 km의 거리에서 10 msec 정도의 도달 변화 시간을 관측하므로 음속변화는 0.0045 m/sec, 온도변화로는 $0.001^{\circ}C$ 까지 감지할 수 있다. 따라서, ATOC는 지구온난화와 같은 장기적이고 미세한 온도변화를 관측하는 데에 이용될 수 있다.

OAT에서 "tomo"는 그리스어로 slice를 의미한다. 즉, 해양의 단면에 대한 물리적인 성질을 음향을 이용하여 정보를 얻는 것이다. 현재 가장 활발히 연구되는 토모그래피는 수백 km 정도의 해역에서 송신기와 수신기를 배열함으로써 도달시간과 eigenray(송신기와 수신기 사이에 음파가 전달되는 경로)를 연관지어 수직단면 뿐만 아니라 특정 깊이에서의 수평단면에 대한 음속을 역산하는 방법이다. 이에 대한 연구는 10여 차례에 걸친 대규모 실험을 통해서 활발하게 연구되고 있다. 이러한 OAT가 성공적으로 이루어질 경우 해양의 원격탐사가 실시간으로 이루어질 수 있다는 점에서 군사 및 산업분야에 획기적인 전환점이 마련될 수 있다.

또 다른 연구분야로서, 표적의 위치나 운동에 대한 정보 또는 해양환경에 대한 정보를

얻기 위한 방법으로 MFP (Matched Field Processing)방법에 이어 TRM (Time Reversal Mirror)현상이 활발하게 연구되고 있다. MFP는 해양환경에 대한 정보가 주어진 경우 수중음향 전파모델을 사용하여 음원위치추정 (source localization)과 운동분석에 이용되거나, 또는 해양환경의 음향특성에 관계되는 변수를 추정하기 위해서 사용된다. 이를 위해서는 모델링이 충실히 이루어져야 할 뿐 아니라 해양환경에 대한 입력변수도 충분히 알고 있어야 한다. 최근에 수중음향학계에 많은 관심을 끌고 있는 TRM은 반면 해양환경에 대한 정보가 전혀 없는 경우에도 음원의 위치 파악이나 해양환경의 변화와 phase conjugation과의 관계를 통한 표적탐지나 해양환경의 연구에 이용될 수 있는 가능성을 제시하여 주고 있다⁽³⁾. TRM은 오래 전에 광학분야에서 제기된 개념으로, A 위치의 송신기에서 송신된 신호를 B 위치에서 수신한 후, 그 신호를 뒤집어 (time reversal, 또는 phase conjugation이라는 말은 여기서 유래함) B 수신기위치에서 송신하면 A 위치의 수신기에서는 원래 송신된 신호를 가장 잘 수신할 수 있다는 원리이다. 물론, 수신된 신호로부터 환경과의 관계를 규명하는 것은 쉽지 않은 연구과제를 남겨주고 있지만, TRM을 이용하면 환경의 급격한 변화를 탐지할 수 있기 때문에 표적탐지 분야에는 쉽게 적용될 수 있다.

또한, 산업분야에서는 어군탐지 및 제어, 해양계측 및 지층탐사, 해양구조물의 탐지 및 위치추적, 수중통신 등에 이용되고 있다. 최근에는 수중에서 발생하는 지진현상과 같은 방사소음으로부터 해양환경에 대한 정보를 얻는 기술들도 활발히 연구되고 있다. 이러한 배경소음은 물론 표적의 탐지와 수중통신에 지대한 영향을 미치기 때문이다.

5. 맺 음 말

본 원고에서는 수중음향의 구성요소와 최근에 학술지에서 자주 다루어지는 연구분야를 간략히 서술함으로써 수중음향에 대한 소개를 시도하였다.

국내에서의 수중음향에 관련된 산업은 국방 과학연구소를 중심으로 한 방위산업이 주축이 되어 있다. 방위산업분야는 기술보호와 그의 특수성 때문에 독자적인 기술보유가 필수적일

뿐만 아니라, 잠수함을 보유하면서 수중음향에 대한 현장에서의 요구가 시급해지면서 비로소 수중음향의 발전배경이 갖추어지고 있다고 할 수 있다.

음파는 기본적으로 전자기파에 비해 저주파 저속 정보전달 매체이고, 그 환경이 해양이라는 점에서 전달손실, 다중경로, 복반사, 음영 지역 등과 같은 전달현상의 복잡성이 내재되어 있지만, 신호처리에 있어서는 저주파이기 때문에 오히려 이산화가 용이하고 신호처리의 속도가 빠르다. 따라서, 범용으로 개발된 디지털기술이 쉽게 적용될 수 있다는 점에서, 해양 환경에서의 음파전달현상에 대한 기초연구가 뒷받침된다면, 방위산업뿐만 아니라 기초과학 및 산업분야에서도 선진국의 수준에 쉽게 도달할 수 있는 경쟁력 있는 분야라고 여겨진다.

참 고 문 헌

인용된 문헌

- (1) S.C. Schreppler, G.M. Jepsen, and S.L. Kneessi, "Intermediate Scale Measurement System: A State of the Art Facility for Naval Astructural Acoustics Research: System Overview and Measurement Results," J. Acoust. Soc. Am., Vol.100, No. 4, Pt. 2, pp. 2721~2722, Oct. 1996
- (2) Web Site : <http://atoc.ucsd.edu/index.html>
- (3) W.A. Kuperman, W.S. Hodgkiss, H.C. Song, T. Akal, C. Ferla, D.R. Jackson, "Phase Conjugation in the Ocean: Experimental Demonstration of an Acoustic Time-Reversal Mirror," J. Acoust. Soc. Am., 103(1), Jan. 1998

인용되지 않은 수중음향관련 문헌

- (1) Robert J. Urick, Principles of Underwater Sound, McGraw-Hill Company, 1983
- (2) William S. Burdic, Underwater Acoustic System Analysis, Prentice-Hall, Signal Processing Series, Alan V. Oppenheim, Editor, 1984