

능동소나 성능분석을 위한 신호 합성 모델

이 균 경(李 均 景)

경북대학교 전자·전기공학부

전화 : (053) 950-5546 / 팩스 : (053) 950-5505

Signal Synthesis Model for Active Sonar Performance Analysis

Kyun Kyung Lee

School of Electronics and Electrical Engineering Kyungpook National University

E-mail : kklee@ee.kyungpook.ac.kr

Abstract

In this paper, we develop an active sonar signal synthesis model to analyze the detection performance of active sonar systems in a shallow water environment. Using this model, we synthesize the return signal of a bistatic sonar system at a typical operating frequency. This signal can be used to test proper active sonar signal processing techniques for real applications.

I. 서론

최근 잠수함기술의 발달로 인해 잠수함의 방사소음이 줄어들고 정숙화가 진행됨에 따라 수동소나 시스템의 탐지거리가 급격히 줄어들 가능성이 존재하게 되었다. 이에 대처하기 위하여 선진 각국에서는 능동소나

시스템을 개발하여 시험운용하고 있으며, 능동소나 시스템의 성능을 분석하고 예측하기 위한 모델에 관한 연구가 진행되고 있다[1].

일반적으로 능동소나의 신호처리기와 그의 탐지성능은 잡음제한 조건하에서 연구되고 있으나[2], 실제적으로 우리나라의 해역은 천해이므로 능동소나를 운용하기 위해서는 잔향제한 조건하에서 신호처리를 평가하고 적절한 신호처리 기법을 선정하여야 한다[3]. 이를 위하여서는 신호처리기에 입력에 인가되는 실제적인 신호를 합성하여야 한다[4]. 능동소나의 수신신호는 수중에서 음파가 전달될 때 발생하는 해저면, 해수면, 수중에서의 반사, 산란, 흡수 등 간섭현상에 의하여 심각한 영향을 받는다. 따라서 능동소나 시스템의 성능을 분석하기 위한 신호합성 모델링에서는 먼저 음속, 흡수계수, 해수면 및 해저면 반사손실과 해수면, 해저면 그리고 체적 산란강도 등을 포함하는 수중환경에 대한 모델링이 선행되어야 한다. 이를 기반으로 한 전달(propagation), 잔향(reverberation) 그리고 소음(noise)

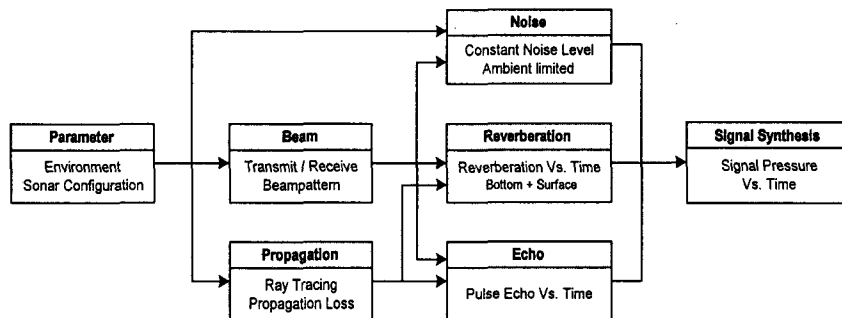


그림 1. 능동소나 신호합성 모델

Figure 1. Active sonar signal synthesis model.

에 대한 수학적 모델링이 이루어지면, 이 세 가지 모델들을 이용하여 능동소나 신호합성모델을 구현할 수 있다.

본 논문에서는 능동소나 신호합성모델을 음선추적(ray tracing) 기법을 이용하여 구현하고, 천해환경의 음속구조에 대한 능동소나 시스템의 수신신호를 합성한다.

II. 능동소나 신호합성모델

능동소나의 신호합성모델은 그림 1과 같이 구성한다. 첫 번째 단계에서 먼저 탐지성능을 분석하기 위해 요구되는 수중환경, 능동소나 시스템의 형태, 그리고 표적에 대한 정보를 설정하고, 두 번째 단계에서 이 정보를 이용하여 각 소나시스템 송·수신기의 빔패턴과 신호원에서 표적까지의 전달경로와 전달손실을 구한다. 세 번째 단계에서 앞에서 구한 전달경로와 전달손실로부터 표적으로부터 되돌아오는 표적신호를 합성하고, 산란원으로부터 되돌아오는 잔향신호를 합성하며, 수중환경에 따른 수신기에서의 소음신호를 합성한다. 네 번째 단계에서는 이들 신호를 종합하여 음향환경이 고려된 수신신호를 신호처리기에 인가한다.

본 논문에서는 거리독립모델 중에서 계산량이 적고 간단한 음선추적기법을 이용하여 음파의 전달을 해석하였다. 거리독립 음속구조(SSP : Sound Speed Profile) 환경에서 음선의 진행위치와 진행시간은 수평거리를 변위로 하는 일차 미분방정식의 형태로 나타난다[5]. 따라서 음선의 초기위치와 진행각도를 초기치로 하여 음파의 전달경로와 전달시간을 알 수 있다. 또한 전달 모델에서 전달경로와 함께 고려해야 할 것은 전달손실이며, 이를 추정하기 위해서는 확산손실, 해수면 반사손실, 해저면 반사손실, 흡수손실을 고려해야 한다.

수중에서의 음속은 수심의 변화에 따라 변하게 되므로, 기존의 구형확산이나 원통형확산으로 근사화한 해석방법을 이용하면 오차가 발생하므로 본 모델에서는 임의의 위치에서의 음선의 위치정보와 각도정보를 이용하여 확산에 의한 손실을 고려하였다.

수중 경계면이나 매질의 흡수에 의해 발생하는 음파의 손실은 음향환경에 따라 다르게 나타나는 복잡한 현상을 보이므로 이에 대한 완전한 수학적 모델은 아직 정립되지 않았으며 일반적으로 경험적인 모델을 사용한다. 해저면 반사손실은 Weinberg 등이 해저면 상태, 주파수, 그리고 입사각에 따라 분류한 손실계수를 이용하였고, 해수면 반사손실은 Marsh 등이 해상 자료로부터 해상 상태에 따른 반사손실을 실험적으로 구한 실험식을 사용하였다[6]. 매질의 흡수손실은 일반

적으로 수중에서의 음파의 해석 시에 널리 사용하는 Throp이 제안한 실험식을 사용하였다[7].

이러한 전달손실의 요인들을 모두 고려하면 음선을 따라가면서 변하는 음파의 세기는 식 (1)과 같다.

$$I_{r_1, z_1} = \eta_{sp}(\eta_{surf})^{n_{surf}}(\eta_{bot})^{n_{bot}} 10^{-aS/10} I_{r_0, z_0} \quad (1)$$

여기서 n_{surf} , n_{bot} 는 각각 해수면과 해저면에 반사되는 회수이며, $-10 \log \eta_{sp}$, $-10 \log \eta_{surf}$, $-10 \log \eta_{bot}$, a 는 각각 확산손실, 해수면 반사손실, 해저면 반사손실 그리고 흡수손실이다.

천해에서는 해수면과 해저면에서 반사가 자주 일어나므로 체적 잔향신호는 큰 영향을 미치지 못한다. 따라서 본 모델에서는 잔향신호성분중에서 우세한 신호성분인 해수면 잔향신호와 해저면 잔향신호만을 고려하였으며, 다중경로를 통해 들어오는 잔향신호를 모두 고려하였다.

산란강도(scattering strength)는 잔향신호의 크기를 결정하는 기본적인 비로써 경계면의 상태, 신호의 주파수와 입사각에 따라 결정되어진다. 본 모델에서는, 해수면 산란강도는 일반적으로 많이 이용되는 Chapman과 Harris에 의한 실험식을 이용하였고 해저면 산란강도는 Lambert's scattering law를 이용하였다[7]. 음원으로부터 임의의 산란원을 연결하는 각각의 전달경로에 대한 잔향신호의 세기는 식 (2)와 같고, 이를 dB 단위로 나타내면 잔향준위를 얻을 수 있다.

$$I_{RL, \phi\theta} = 10^{SL/10} A(\phi, \theta, \theta') T_X(\phi, \theta) T_R(\phi, \theta') B_X(\phi, \theta) B_R(\phi, \theta') 10^{S_{S,B}(\phi, \theta, \theta')/10} \quad (2)$$

여기서 SL 은 음원준위(Source Level)이다. X 와 R 는 각각 송신단에서 산란원까지의 경로와 산란원에서 수신단까지의 경로를 나타내고, B_X 와 B_R 는 송신단과 수신단의 빔패턴을 나타낸다. t_X 와 t_R 은 각각 송신단에서 산란원까지 그리고 산란원에서 수신단까지의 전달시간이며, T_X 와 T_R 는 각각 송신단에서 산란원까지 그리고 산란원에서 수신단까지의 전달손실을 나타낸다. A 는 산란원의 면적이고 $S_{S,B}$ 는 해수면, 해저면 산란강도이다.

전체 해수면과 해저면에 의한 잔향신호의 압력은 식 (2)로부터 구한 잔향준위를 압력으로 변화시킨 다음 위상을 고려하여 모든 가능한 전달경로에 대해 신호의 압력을 합하여 식 (3)과 같은 방법으로 얻는다.

$$P_{RL}(t+t') = \sum_{\phi} \sum_{\theta} \sum_{\theta'} (-1)^n \sqrt{\rho c I_{RL, \phi\theta\theta'}(t)} \cos \omega t' \quad (3)$$

$$, 0 < t' < \tau$$

여기서 τ 는 펄스길이이고 n 은 수면에 반사된 회수이다.

능동 소나의 운용 주파수 대역(1kHz < f < 10kHz)에서는 다른 소음원의 영향에 비해 바람에 의한 수면 소음의 영향이 우세하다. 따라서 본 모델에서는 수면에 의한 소음준위를 결정하는 Knudsen 등에 의해 실험적으로 얻어진 식 (4)를 이용하였다[8].

$$NL = -17.13 \log f + 40 + 20 \log v \quad (4)$$

표적에 반사되어 되돌아오는 신호의 크기는 표적의 크기와 반사면의 상태에 따라서 결정되며, 여러 가지의 전달경로가 존재할 수 있으므로 가능한 전달경로들을 모두 고려해줘야 한다. 따라서 음원으로부터 표적까지의 전달손실을 구하기 위해서 음속구조와 음원의 위치, 표적의 위치정보로부터 음원과 표적을 연결하는 모든 가능한 전달경로에 대하여 전달손실을 구해야 한다. 임의의 전달경로를 따라 표적에 반사되어 되돌아오는 표적신호준위는 식 (5)와 같다.

$$I_{EL, \phi \theta \theta'} = 10^{SL/10} T_X(\phi, \theta) T_R(\phi, \theta') B_X(\phi, \theta) B_R(\phi, \theta') 10^{TS/10} \quad (5)$$

여기서 $I_{EL, \phi \theta \theta'}$ 는 수신기에 도달하는 음파의 세기이고 TS 는 표적강도(target strength)이다. 식 (5)로부터 구한 표적신호준위를 압력으로 변화시켜 위상을 고려하여 조합이 가능한 모든 경우에 대해 음파의 압력을 합하면 식 (6)을 얻는다.

$$P_{EL}(t+t') = \sum_y \sum_{\theta'} \sum_{\theta} (-1)^n \sqrt{\rho c I_{EL, \phi \theta \theta'}(t)} \cos \omega t' \quad (6)$$

$$\omega = 2\pi f \left(1 - \frac{2v}{c}\right) \quad , \quad 0 < t' < \tau$$

여기서 ω 는 표적의 속도에 의한 도플러 변위를 고려한 표적신호의 각주파수이고, v 는 표적의 이동속도이다.

실제 능동소나의 수신신호는 잔향신호와 소음신호 그리고 표적신호가 더해진 신호이므로 각각의 하부모델로부터 구한 신호들을 시간상에서 더하면 신호처리기에 입력되는 합성된 수신신호는 식 (7)과 같다.

$$P_{total}(t) = P_{EL}(t) + P_{RL}(t) + P_n(t) \quad (7)$$

여기서 $P_n(t)$ 는 음파의 세기를 압력으로 변화시킨 소음신호이다.

III. 모의 실험

모의실험에서는 탐지성능에 영향을 미치는 해상환경, 표적정보를 현실에 알맞게 가정해서 능동 소나시스템의 수신신호를 합성하였다.

천해에서의 음속구조는 그림 2와 같이 크게 4가지로

분류하여 사용하였고, 수심은 120m로 설정하여 천해환경을 대표하도록 하였다. 해상상태(sea state)는 3으로 설정하고, 해저면의 구성물질은 해저면상태(bottom type)가 3인 굵은 모래로 가정하였다. 모의실험에서는 HMS(Hull Mounted Sonar)와 TASS(Towed Array Sonar System)를 결합한 시스템에 준하여 소나 파라미터를 결정하였다. 송신기의 수직방향 빔폭과 수평방향 빔폭은 각각 17°, 10°이고, 수신기의 수직방향 빔폭과 수평방향 빔폭은 각각 180°, 2°이다. 시스템의 손실은 3dB로 가정하였다. 수신기의 음원준위는 235dB이고 송신신호로는 주파수가 7kHz이고 펄스길이가 500ms인 CW 펄스를 사용하였다. 표적은 표적강도가 5dB정도인 소음이 작은 소형 잠수함이고, 수신기로부터 멀어지는 방향으로 5knot의 속도로 이동한다고 가정하였다. 표적의 위치는 모든 경우에 대해 수심 60m로 고정하였다.

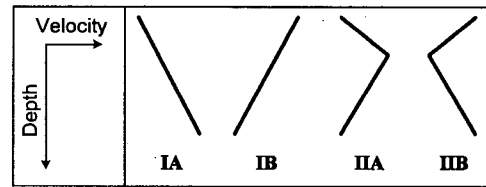


그림 2. 대표적 음속구조

Figure 2. Typical sound speed profile.

그림 3과 그림 4를 비교하면 송신기가 수면근처에 위치하여 있으므로 양의 기울기를 가지는 음속구조 IA의 경우에는 주된 잔향신호 성분이 수면에 의한 것이고, 음속구조 IB의 경우에는 해저면에 의한 잔향신호가 주된 신호 성분이 된다. 일반적으로 해저면 산란강도가 해수면 산란강도보다 크므로 음압은 IB의 구조에서 크게 나타난다.

음속구조 IIA는 해수면과 해저면에 채널을 형성하는 음속구조이고 음속구조 IIB는 채널을 형성하는 음속구조이다. 그림 5와 그림 6을 비교하면 채널을 형성하는 음속구조에서는 음파가 채널의 중심으로 모이기 때문에 해수면과 해저면의 잔향신호가 작은 크기를 가지는 것을 볼 수 있다. 이것은 채널이 형성된 수중음향환경에서는 잔향신호의 영향이 줄어들게 되어 표적의 탐지가 용이하다는 것을 뜻한다. 이와 같이 능동소나의 수신신호는 음향환경에 의한 영향을 많이 받게 되고 이러한 영향은 구현한 모델에서와 같이 음파의 전달경로를 신호합성에 고려함으로써 실제 수신신호와 유사한 합성신호를 얻을 수 있다.

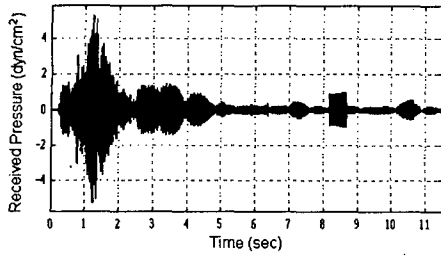


그림 3. 음속구조 IA에서의 수신신호
Figure 3. Received signal for type IA SSP.

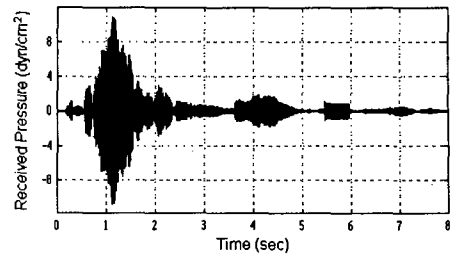


그림 5. 음속구조 IIA에서의 수신신호
Figure 5. Received signal for type IIA SSP.

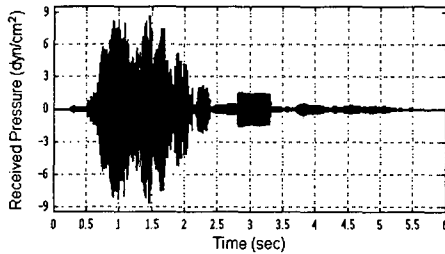


그림 4. 음속구조 IB에서의 수신신호
Figure 4. Received signal for type IB SSP.

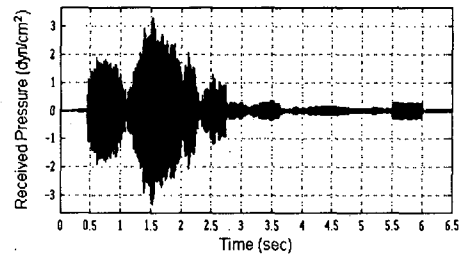


그림 6. 음속구조 IIB에서의 수신신호
Figure 6. Received signal for type IIB SSP.

IV. 결론 및 추후연구

본 논문에서는 능동소나의 성능분석을 위한 신호합성모델을 구현하고 음속구조에 따른 수신신호를 합성하였다. 그 결과 합성된 신호는 음속구조의 종류에 따라 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 신호처리와 그의 탐지성능은 잡음제한 조건하에서 연구되고 있으나, 실제적으로 우리 나라의 해역이 천해인 조건을 감안하여 능동형 TASS를 운용하기 위해서는 잔향제한 조건하에서 신호처리를 평가하고 적절한 신호처리 기법을 선정하여야 한다. 현재 여러 가지 기법을 이용한 신호처리를 구현하여 신호합성모델로부터 얻은 신호를 처리함으로써 실제 능동소나 시스템의 신호처리에 가장 적합한 신호처리기법을 선정하는 연구를 수행하고 있다.

V. 참고문헌

[1] P. C. Etter, "Underwater Acoustic Modeling: Principles, Techniques and Applications (2nd ed.)", Chapman and Hall, London, 1996.

[2] M. R. Denny, "Surface ship towed array sonar - active or passive?", UDT92, pp. 345-349, Jul. 1992.
 [3] B. Reise and P. C. Etter, "Performance assessment of active sonar configuration options", UDT97, pp. 408-413, Jun. 1997.
 [4] A. D. Jones et al, "Active sonar simulated returns compared in a shallow water scenario", UDT Pacific 98, pp 153-157, Feb. 1998.
 [5] L. J. Ziomek, "Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing", CRC Press, 1995.
 [6] W. S. Burdic, "Underwater Acoustic System Analysis (2nd ed.)", Prentice Hall, New Jersey, 1991.
 [7] R. J. Urick, "Principles of underwater Sound (3rd ed.)", McGraw-Hill, New York, 1983.
 [8] V. O. Knudsen, R. S. Alford, and J. W. Emling, "Underwater ambient noise", J. Marine Res., vol. 7, pp. 410-429, 1948.