

# 거리의존 해양환경에서 수동소나체계의 표적탐지거리예측

김 태 학\* · 김 재 수\*\*

## Detection Range of Passive Sonar System in Range-Dependent Ocean Environment

Tae-Hak Kim\* · Jea-Soo Kim\*\*

### 요 약

원거리에서 수동소나에 의한 탐지거리를 예측하기 위해서는 소나방정식이 이용된다. 본 연구에서는 거리와 깊이함수의 신호이득 및 탐지확률을 구한 후 이를 거리로 적분하여 거리 의존 해양환경에서 탐지거리를 계산하는 탐지거리 예측모델을 개발하였다. 개발된 모델은 기존에 발표된 거리 독립 해양환경에서의 결과와 비교하여 검증하였고, 이를 바탕으로 거리 의존 해양환경에서 수동소나에 의한 표적탐지에 큰 영향을 주는 나수성 소용돌이 해양환경에 확장 적용하여 표적의 탐지거리를 예측하였으며, 그 결과에 대하여 소개한다.

### Abstract

The prediction of detection range of a passive sonar system is essential to estimate the performance and to optimize the operation of a developed sonar system. In this paper, a model for the prediction of detection range in a range-dependent ocean environment based on the sonar equation is developed and tested. The prediction model calculates the transmission loss using PE propagation model, signal excess, and the detection probability at each target depth and range. The detection probability is integrated to give the estimated detection range.

In order to validate the developed model, two cases are considered. One is the case when the target depth is known. The other is the case when the target depth is unknown. The computational results agree well with the previously published results for the range-independent environment. Also, the developed model is applied to the range-dependent ocean environment where the warm eddy exists. The computational results are shown and discussed.

The developed model can be used to find the optimal frequency of detection, as well as the optimal search depth for the given range-dependent ocean environment.

\* 해군 작전사령부

\*\* 한국해양대학교 조신해양공학부

(접수일자 : 1996년 12월 30일)

### I. 서 론

소나체계는 송·수신 형태에 따라 능동소나와 수동소나로 구분할 수 있으며, 원거리에서의 탐지를 위해서는 주로 수동소나가 이용된다. 소나의 탐지거리를 예측하는 것은 소나체계의 성능을 예측하는 것과 같은 과정으로, 소나방정식을 이용하여 탐지거리를 계산하게 된다. 이러한 탐지거리를 예측하기 위한 노력은 능동 및 수동소나체계에서 여러 가지 모델로 수행되어 왔다[1-3]. 그러나, 이 모델들은 단지 거리만의 함수로서 탐지확률을 구한후 탐지거리를 계산하였는데, 소나체계에 대한 보다 정확한 예측을 위해서는 거리와 깊이함수의 탐지확률과 탐지거리 계산 알고리즘이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 거리와 깊이함수의 신호이득 및 탐지확률을 구한 후 이를 거리로 적분하여 탐지거리를 계산하는 탐지거리 예측모델을 개발하였다. 개발된 모델은 기존에 발표된 거리 독립 해양환경에서의 결과와 비교하여 검증하였고, 이를 바탕으로 거리의존 해양환경에서 수동소나에 의한 표적탐지에 큰 영향을 주는 난수성 소용돌이 해양환경에 적용하여 표적의 탐지거리를 예측하였으며, 그 결과에 대하여 소개하였다. 또한, 본 연구에서 개발된 모델에서는 음파전달모델로 포물선 방정식 모델로서 거리의존 해양환경에서 음향학적 문제를 해결하는데 매우 유용한 모델로 알려져 있는 Collins의 RAM[4][5]을 사용하였다.

### II. 탐지거리 계산이론

소나체계에서 소나방정식은 신호이득으로 표현되며, 특히 수동소나방정식에서의 신호이득은 다음 식(1)과 식(2)에서와 같이 표적의 방사소음준위(SL), 배경소음준위(NL), 방향성이득(DI), Detection Threshold(DT) 및 전달손실(TL)과의 관계로부터 구할 수 있다.

$$FOM = SL - NL + DI - DT \quad (1)$$

$$SE(FOM, r, z_r | z_s) = FOM - TL(r, z_r | z_s) \quad (2)$$

여기에서,  $z_s$ 는 표적의 깊이이고,  $z_r$ 은 수신기의

깊이이며,  $r$ 은 표적과 수신기간의 거리이다. 계산된 신호이득은 거리에 따라 탐지확률을 가지는데, 각 거리에서 신호이득은 다음과 같이 대수표준분포로 나타낼 수 있다.

$$P_D(SE) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{SE} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (3)$$

여기에서,  $\sigma$ 는 신호이득의 표준편차로 여러값에 따라 다양한 곡선으로 나타나며, 일반적으로 8-9 dB 사이의 값을 갖는다[5]. 그러나, 본 연구에서는 표준편차를 8 dB로 가정하였으며, 이 신호이득을 가지고 가정된 표준편차에 대입한 후 신호이득의 축으로 적분을 하면 신호이득에서의 탐지확률을 구할 수 있다. 가정된 탐지확률과 신호이득의 관계는 그림 1과 같다.

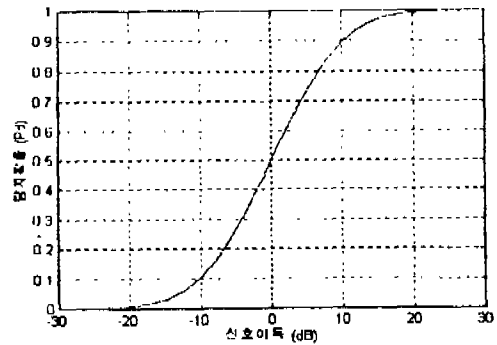


그림 1.  $\sigma=8\text{dB}$ 일때의 신호이득 대 탐지확률( $p(FA)=10^{-4}$ )

이와같이 거리와 깊이에 따라 신호이득의 값이 변하며 탐지확률이 변하므로, 각각의 거리와 깊이에 대한 탐지확률이 계산되면 이를 거리로 적분하여 탐지거리를 구하게 된다. 즉 탐지거리는 신호이득, 표적깊이, 수신기깊이의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$DR(SE, z_s, z_r) = \int_0^{\infty} P_D(SE, z_s, z_r, r) dr \quad (4)$$

그러나, 표적의 깊이를 모르는 경우에는 우선 전달손실을 계산하는 과정에서 표적과 수신기의

위치를 바꾸어 생각하는 것이 필요하며, 이것은 principle of reciprocity[6]에 의해 가능하다. 그림 2에서와 같이 표적이 S1에 있을때 각 수신기 R1-R5에서의 전달손실이 계산된다. 이결과는 R1위치에 표적 S1이 있고, S1위치에 수신기 R1이 있다고 생각할 수 있으며, 일반적으로는 R<sub>i</sub>위치에서의 전달손실은 표적이 R<sub>i</sub>에 해당하는 거리 및 깊이에 있고 수신기가 S1위치에 있을 때의 전달손실과 같다.

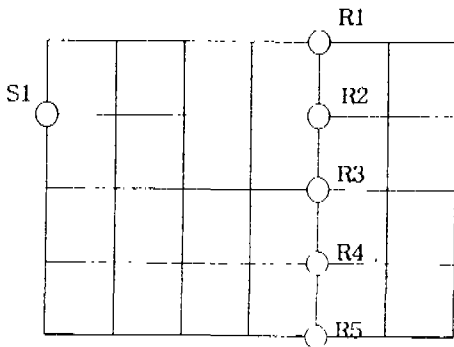


그림 2. Reciprocity의 원리

또한, 탐지 확률은 표적의 깊이를 모르기 때문에 식(3)에서 구한 탐지 확률에 표적이 특정한 수심  $Z_s$ 에 존재할 확률  $p(Z_s)$ 를 곱하여 식 (5)와 같이 계산할 수 있고,

$$P_D^{USD}(SE, r, Zr) = \int_0^\infty p(Z_s) P_D(SE, r, Z_s | Z_s) d(Z_s) \quad (5)$$

탐지 거리는 식(6)으로부터 계산된다[3]

$$DR^{USD}(SE, Zr) = \int_0^\infty P_D^{USD}(SE, r, Z_s) dr \quad (6)$$

여기에서, USD는 Unknown Source Depth를 의미하며, 예를 들어 표적이 존재할 확률  $p(Z_s)$ 를 500 m까지는 일정하고, 그 이하의 수심에서는 존재하지 않는다고 가정하면,

$$p(Z_s) = \begin{cases} 1/500, & Z_s \leq 500 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

와 같이 표현된다[3]

### III. 탐지거리 예측모델의 검증

개발된 탐지거리 예측모델의 검증을 위하여 주파수는 50Hz의 저주파를 사용하였고, 표적 및 수

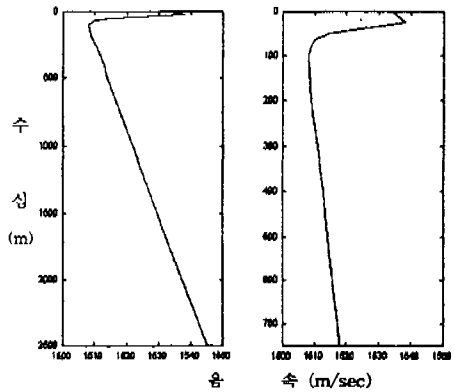
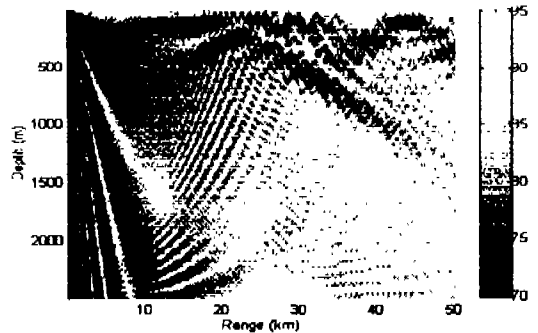
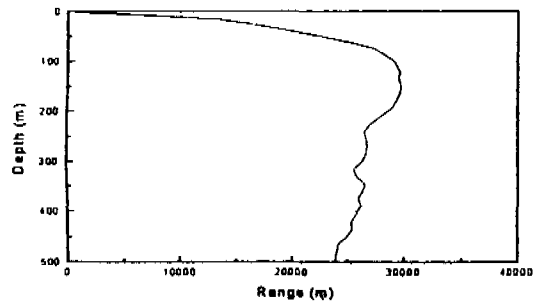


그림 3. 기존문헌의 음속구조

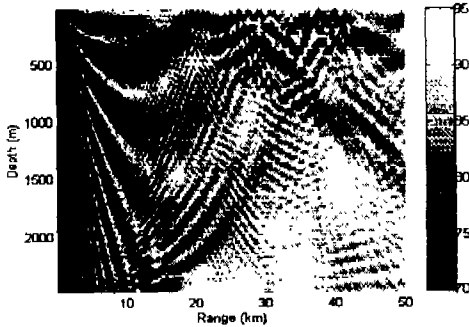


(a) RAM의 전달손실 계산결과

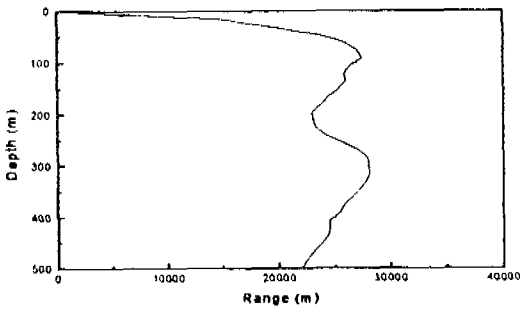


(b) 탐지거리 계산결과

그림 4. 표적깊이 100 m일때의 전달손실 및 탐지거리 계산결과



(a) RAM의 전달손실 계산결과



(b) 탐지거리 계산결과

그림 5. 표적깊이 300 m일때의 전달손실 및 탐지거리 계산결과

신기의 깊이는 각각 100 m와 300 m, 음원준위는 125 dB, 해상상태는 3으로 하였으며, 최대수심 2500 m, 최대거리는 50 Km로 가정하여 그림 3과 같이 기존문헌의 음속구조와 동일한 거리돌림 해양환경에서 탐지거리를 계산하였다. 또한, 해저면의 음속은 1590 m/sec, attenuation은 0.5 dB/λ, 밀도  $\rho=1.2 \text{ g/cm}^3$ 로 가정하였다.

표적의 깊이가 100 m일때와 300 m일때의 전달손실 및 탐지거리 계산결과는 그림 4 및 5와 같으며, 이를 고찰해 보면 표적이 위치한 깊이에서 탐지거리가 최대가 됨을 알 수 있고, 표적의 깊이를 300 m로 변경하였을 때는 표적의 깊이에서 뿐만 아니라 같은 음속을 갖는 수심 65 m부근에서도 탐지거리가 길게 나타나는 현상을 관찰할 수 있다. 이로부터 본 탐지거리가 예측모델에서 계산된 탐지거리가 Ferla와 Porter가 보인 결과[3]와 동일함을 알 수 있었다.

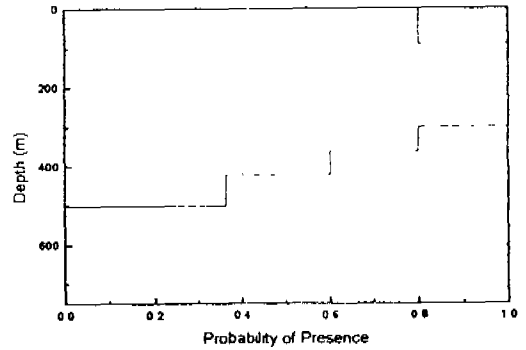
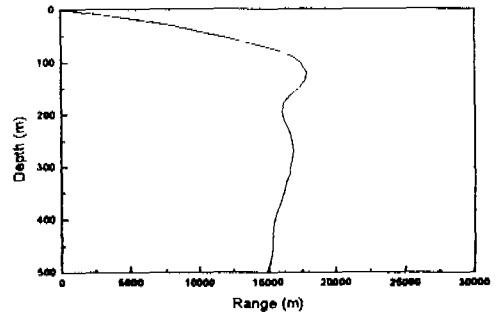
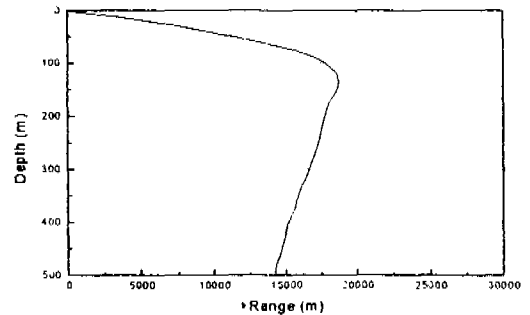


그림 6. 수심에 따라 가중치를 달리한 확률함수



(a) 균일한 확률함수를 가정한 경우



(b) 수심에 따라 가중치를 달리한 경우

그림 7. 표적깊이를 모를때의 탐지거리 계산결과

또한 표적깊이를 모를 때는 앞의 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 탐지거리를 계산하게 되는데, 표적이 존재할 확률함수를 식 (7)과 같이 가정했을때의 탐지거리 계산결과는 그림 7(a)와 같고, 확률함수를 그림 6과 같이 수심에 따라 가중치를 달리한다면 그림 7(b)의 결과를 보인다. 이 결과로부터 표적의

깊이를 모를 경우에는 가중치에 의해 탐지거리는 증감하지만 현재의 음속구조에서 최소음속을 갖는 깊이에서 탐지거리가 가장 길게 나타나며, 이 깊이에서 소나를 운용하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

#### IV. 난수성 소용돌이 환경에서의 탐지거리 계산결과

개발된 소나성능 예측모델을 이용하여 난수성 소용돌이 환경에서 표적이 소용돌이 가장자리에 위치했을 때와 소용돌이 내부에 위치했을 때의 두

가지 경우에 대하여 표적의 깊이를 알 때의 탐지거리와 표적의 깊이를 모를 때의 초기 최적탐지깊이를 계산하였다. 해양환경 및 소나변수들은 앞장에서와 동일하게 입력하였으며, 표적 및 수신기의 깊이만 150 m로 달리하였다.

일반적으로 난수성 소용돌이의 주변에는 강한 수온전선이 형성되고 수온전선 자체가 음파장벽의 역할을 하며, 음파통로(sound channel) 수심의 급격한 변화, 층심도(SLD, surface layer depth)의 차이 및 온도역전 등 해양특성이 급변하므로 표적 및 수신기의 위치에 따라 수중표적에 대한 탐지성능이 달라진다.

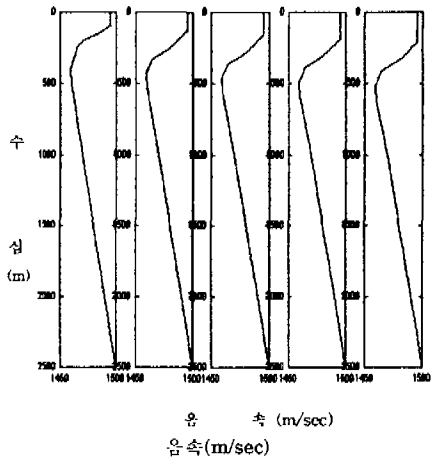
그러나, 난수성 소용돌이의 규모가 워낙 방대하기 때문에 정확히 모델링을 할 수 없으므로, 본 연구에서는 그림 8과 같이 단순한 음속구조를 사용하였으며, 각각의 음속분포에 대한 전달손실 및 탐지거리 계산결과를 그림 9에 나타내었다.

그림 9의 (c)와 (d)를 비교해보면 표적의 위치와 상관없이 표적수심에서 탐지거리가 최대가 되며, 또한 표적의 방사소음은 방향성이 없다고 가정하였기 때문에 표적이 소용돌이 가장자리에 있다면 음파의 특성상 소용돌이의 중심쪽으로 진행하면서 하향굴절하기 때문에 전체적으로 탐지거리가 작게 나타난다. 그러나 반대의 경우에는 먼거리까지 음파의 직진경로가 형성되므로 표적이 소용돌이의 가장자리에 위치했을때보다 전체적으로 탐지거리가 길게 나타남을 알 수 있다.

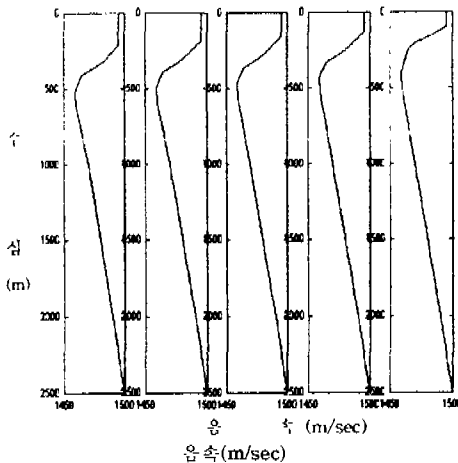
한편, 표적깊이를 모를때는 앞장에서와 같이 확률함수를 균일한 경우와(그림 10 (a), (b))수심에 따라 가중치를 달리한 경우에(그림 10 (c), (d)) 대하여 계산하였다.

#### V. 요약 및 결론

본 연구에서는 소나체계에서 보다 정확한 탐지거리를 예측하기 위하여 거리와 깊이함수의 탐지거리계산 알고리즘을 이용하여 거리 의존 해양환경에서 탐지거리를 예측하는 모델을 개발하였다. 이 알고리즘의 적용을 위해 거리와 깊이함수의 신호이득과 탐지확률 및 탐지거리를 계산하는 과정

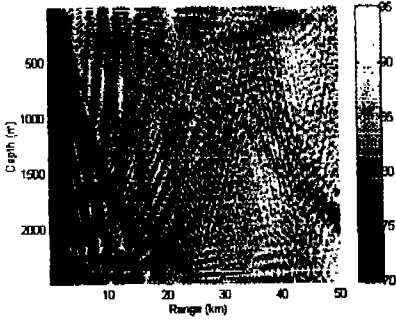


(a) 표적이 소용돌이 가장자리에 있을 때

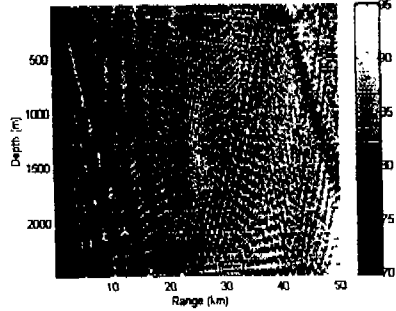


(b) 표적이 소용돌이 내부에 있을 때

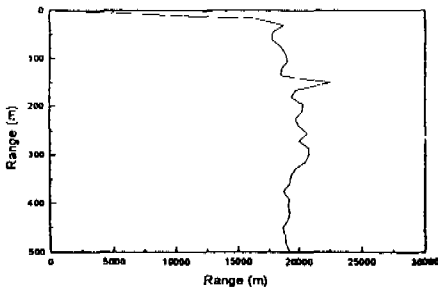
그림 8. 난수성 소용돌이 환경에서의 음속구조



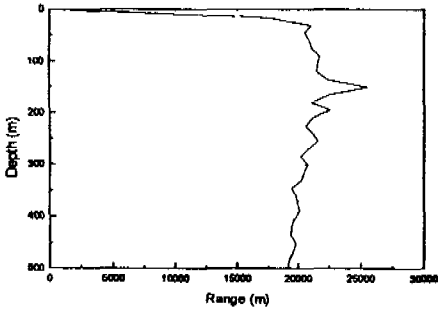
(a) 표적이 소용돌이 가장자리에 있을때의 전달손실



(b) 표적이 소용돌이 내부에 있을때의 전달손실

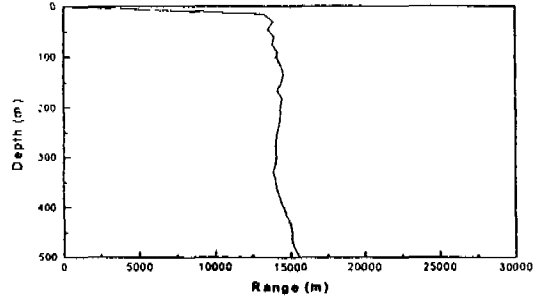


(c) 표적이 소용돌이 가장자리에 있을때의 탐지거리

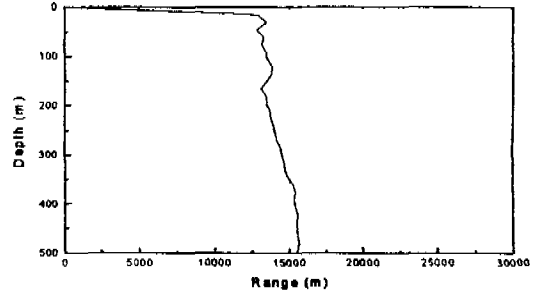


(d) 표적이 소용돌이 내부에 있을때의 탐지거리

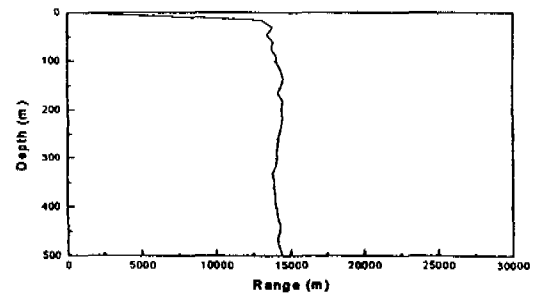
그림 9. 난수성 소용돌이 환경에서의 전달손실 및 탐지거리 계산결과



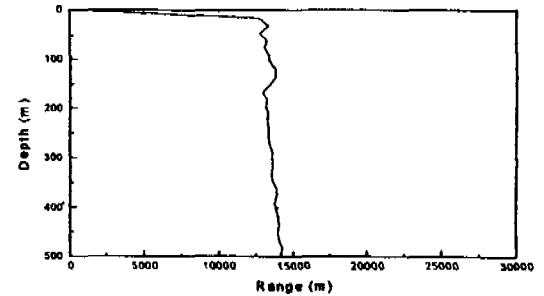
(a) 수신기가 소용돌이 가장자리에 있을때의 탐지거리



(b) 수신기가 소용돌이 내부에 있을때의 탐지거리



(c) 수신기가 소용돌이 가장자리에 있을때의 탐지거리



(d) 수신기가 소용돌이 내부에 있을때의 탐지거리

그림 10. 표적깊이를 모를때의 탐지거리 계산결과

을 유도하였다. 우선 개발된 모델을 거리독립 해양환경에서 50 Hz의 주파수를 이용하여 표적깊이 100 m와 300 m에서 기존의 결과와 비교하여 검증하였고, 이를 기리의존 난수성 소용돌이 환경에 확장 적용하여 표적깊이를 알 때의 탐지거리와 표적깊이를 모를 때의 최적 탐지깊이를 선택하기 위한 탐지거리 계산결과를 보였다.

수동소나체계에서의 수중표적에 대한 탐지거리를 난수성 소용돌이 해양환경에 적용하여 계산해 본 결과 표적이 소용돌이의 가장자리에 있을 경우와 소용돌이의 내부에 있을 경우 모두 표적깊이에서 탐지거리가 최대가 되며, 특히 표적깊이와 음속구조에 따른 방사소음의 하향굴절로 인하여 표적이 소용돌이의 가장자리에 있을 때보다 소용돌이의 내부에 있을 때 탐지성능이 좋아짐을 알 수 있었으며, 또한 표적깊이를 모를 경우에는 현재 음속구조에서 최소음속을 갖는 깊이에서 탐지거리가 가장 길게 나타남을 확인할 수 있었다.

따라서, 소나를 이용하여 표적을 탐시하고자 할 때 탐지성능을 높이기 위해서는 현재의 해양에 대한 정확한 환경조사 및 이해가 필요하며, 특히 난수성 소용돌이 해양환경에서는 수신기가 소용돌이의 가장자리에 위치하고 표적이 소용돌이의 내부에 위치할 때 양호한 탐지성능을 나타냄을 알 수 있었다.

이와같은 결과를 토대로 본 모델은 개발된 소나의 성능예측과 소나의 개발단계에서 사전에 성능예측에 이용될 수 있으며, 해양환경에 따른 초기

최적주파수와 최적탐지깊이의 선정 및 특정 해역에서의 소나운용지침 작성 등의 분야에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 경사진 해지면과 같은 다양한 해양환경에서의 탐지성능에 관한 연구도 이루어져야 하겠다.

## 참고문헌

1. H. Weinberg, Navy Interrim Surface Ship Model(NISSM) II, *NUSC Technical Report 4527*, Oct. 1973.
2. Schippers P., "REACT, A Model for Active Sonar Range Prediction," *UDT' 91 Conf. Proc.*, pp. 999 - 1004, London, UK, April 1991.
3. C. M. Ferla & M. B. Porter, "Receiver depth Selection for Passive Sonar Systems," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 267 - 278, July 1991.
4. M. D. Collins, "Applications and time-domain solution of higher-order parabolic equations in underwater acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.86, pp. 1097 - 1102, 1989.
5. Home Page, <http://ram.nrl.navy.mil>
6. R. J. Urick, *Principles of underwater sound*, McGraw-hill Book Company, New York, 3rd ed. 1983.
7. M. C. Junger, David Feit, *Sound, Structures, and Their Interaction*, pp. 338 - 341, AIP press, 1993.