

공학석사 학위논문

피탐지 확률을 최소화하는 표적 깊이에
관한 연구

Target Depth Selection For Minimization of Detection
Probability

지도교수 김재수


2006년 2월


한국해양대학교 대학원


해양개발공학과

유진수

本 論 文 을 劉 晋 秀 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위원장 : 공학박사 김 성 일  (인)

위 원 : 공학박사 김 재 수  (인)

위 원 : 공학박사 서 영 교  (인)

2006년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

유 진 수

Target Depth Selection For Minimization of Detection Probability

by

Jin Soo Yoo

Department of Ocean Development Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

In the detection of underwater target, there exists an optimal depth for the sonar systems where the detection probability is maximized. In contrast, for the targets, there is a target depth where the detection probability by the sonar system is minimized. In this paper, we address this question from the view point of the target, that is to find the target depth where the detection probability of the target by sonar systems is minimized. The detection probability of the target is dependent on the depths of target and sonar, the submarine topography, the sound speed profile and the generated frequency of the target. In this paper, the detection probability of the target is calculated by the depth for the slope direction of the submarine slope based on the information about the sound speed profile and the submarine topography in the ocean.

목 차

Abstract	I
목 차	II
그림목차	IV
1. 서 론	1
1.1 연구의 필요성 및 목적	1
1.2 연구의 동향	1
1.3 연구내용	2
1.4 논문의 구성	3
2. 소나방정식	4
2.1 음원준위(Source Level, SL)	4
2.2 전달손실(Transmission Loss, TL)	4
2.2.1 파동방정식	5
2.2.2 포물선 방정식	6
2.2.3 거리종속 음향모델	14
2.2.4 수치해석 기법	16
2.3 소음준위(Noise Level, NL)	18
2.4 지향지수(Directivity Index, DI)	20
2.5 탐지문턱(Detection Threshold, DT)	22
3. 피탐지거리 계산을 위한 알고리즘	24
4. 수치실험	26
4.1 센서의 깊이가 알려진 경우	26

4.1.1 Down slope 탐지환경	26
4.1.2 Up slope 환경	40
4.2 센서의 깊이를 모를 경우	50
5. 결 론	53
참 고 문 헌	54

그림 목차

그림2.1 각 포물선 방정식에서의 위상오차 대 전파각도	13
그림2.2 사선 시스템의 해법	15
그림2.3 심해수중소음의 평균스펙트럼	19
그림2.4 선배열 소나의 지향지수	21
그림2.5 ROC 곡선	23
그림3.1 신호이득에 대한 임의의 탐지확률	25
그림4.1 동해해역의 수심정보	27
그림4.2 Down slope환경의 탐지해역 정보	28
그림4.3 Sound profile	29
그림4.4 음원수심 20m일 때의 전달손실(400Hz)	30
그림4.5 음원수심 90m일 때의 전달손실(400Hz)	31
그림4.6 음원수심 200m일 때의 전달손실(400Hz)	31
그림4.7 가역성의 원리(principle of reciprocity)	33
그림4.8 센서수심 20m일 때의 피탐지거리(400Hz)	34
그림4.9 센서수심 90m일 때의 피탐지거리(400Hz)	35
그림4.10 센서수심 200m일 때의 피탐지거리(400Hz)	35
그림4.11 음원수심 20m일 때의 전달손실(50Hz)	36
그림4.12 음원수심 90m일 때의 전달손실(50Hz)	37
그림4.13 음원수심 200m일 때의 전달손실(50Hz)	37
그림4.14 센서수심 20m일 때의 피탐지거리(50Hz)	38
그림4.15 센서수심 90m일 때의 피탐지거리(50Hz)	39
그림4.16 센서수심 200m일 때의 피탐지거리(50Hz)	39
그림4.17 Up slope환경의 탐지해역 정보	40
그림4.18 음원수심 20m일 때의 전달손실(400Hz)	41
그림4.19 음원수심 90m일 때의 전달손실(400Hz)	42
그림4.20 음원수심 200m일 때의 전달손실(400Hz)	42

그림4.21	센서수심 20m일 때의 피탐지거리(400Hz)	43
그림4.22	센서수심 90m일 때의 피탐지거리(400Hz)	44
그림4.23	센서수심 200m일 때의 피탐지거리(400Hz)	44
그림4.24	음원수심 20m일 때의 전달손실(50Hz)	45
그림4.25	음원수심 90m일 때의 전달손실(50Hz)	46
그림4.26	음원수심 200m일 때의 전달손실(50Hz)	46
그림4.27	센서수심 20m일 때의 피탐지거리(50Hz)	47
그림4.28	센서수심 90m일 때의 피탐지거리(50Hz)	48
그림4.29	센서수심 200m일 때의 피탐지거리(50Hz)	48
그림4.30	Down Slope 환경에서의 피탐지거리(400Hz)	52
그림4.31	Up Slope 환경에서의 피탐지거리(400Hz)	52

표 목차

표 2.1	전달손실모델의 특성	17
표 4.1	모의실험환경에서 해저지형의 경사 방향에 따른 탐지거리 비교	49

1. 서론

1.1 연구의 필요성 및 목적

수중에서 운용되는 잠수함은 다른 무기체계에 비해 은밀성이라는 독보적인 이점을 보유하고 있으며, 현재 해군에서는 이 분야에 많은 관심을 두고 연구를 진행하고 있다. 은밀성을 가지고 있는 잠수함이지만 수중에서 운용되는 동안 엔진, 추진기 등의 구성요소로 인해 일정하게 방사소음을 발생시킨다. 이렇게 발생하는 소음은 잠수함을 탐지하는 상대방의 선체부착소나(Hull Mount Sonar), 예인선배열소나(Towed Array sonar), 선측배열소나(Flank Array Sonar)등과 같이 탐지 목적의 장비로 하여금 탐지의 원인으로 작용한다. 이런 문제점을 해결하기 위해 현재 국내에서는 잠수함과 같은 수중운동체에서 발생하는 방사소음 제어에 관한 연구가 진행되고 있다. 본 논문의 피탐지확률이 최소화 되는 깊이에 관한 연구는 표적에서 발생하는 방사소음과 관련하여 직접적으로 제어를 하지 않고 해양의 음속분포, 음원과 탐지센서간의 거리 및 수심 등의 환경정보가 가지는 특성을 이용하여 수중에서 표적을 특정 깊이로 운용하여 탐지확률을 감소시키고자 하는 것이다.

1.2 연구의 동향

탐지거리를 예측하기 위한 노력은 능동 및 수동소나체계에서 여러 가지 모델로 수행되어 왔는데 그 몇 가지 예를 살펴보면, 먼저 능동소나체계에서 미 해군의 MISS(Navy Interim Surface Ship Model)II와 Schipper의 REACT(A Model for Active Sonar Range Prediction)등이 있다. MISSM II에

서는 음선이론(ray theory)을 바탕으로 고주파를 이용한 거리에 따라 음속이 변하지 않는 거리독립(range independent)모델이며, 또한 Schipper의 REACT 모델 역시 거리독립 모델로서 수정된 음선이론(modified ray theory)을 바탕으로 20Hz에서 30KHz까지의 주파수를 사용하여 탐지거리를 계산하였다. 그리고 신호발생기에서 발생하는 공동현상과 신호발생기 배열요소 간 발생하는 상호간섭제어를 통한 탐지거리 개선에 관한 연구[1]가 있다. 수동소나 체계에서는 Ferla와 Porter의 음원의 깊이를 아는 경우와 모르는 두 경우에 수신기의 최적탐지깊이 선정에 대한 연구[2]와 다중표적추적에서 표적의 추적탐지확률과 오추적탐지확률의 개선에 관한 연구[3]가 있다.

1.3 연구내용

피탐지거리를 계산하기 위한 연구의 수행과정을 몇 가지로 정리하였다.

첫째, 환경에 대한 정보의 획득이다. 음원이 존재하는 환경의 음속, 수심, 매질에 관련된 밀도, 감쇠계수 등의 매개변수들의 정확한 값을 측정한다.

둘째, 매개변수들을 전달손실 모델에 입력하여 음장을 계산한다.

셋째, 계산된 음장을 이용하여 전달손실을 구한다.

넷째, 전달손실을 이용하여 탐지확률을 구한다.

다섯째, 단위거리에 대한 탐지확률을 거리방향 적분으로 탐지거리를 추정한다.

1.4 논문의 구성

본 논문은 5개의 장으로 구성되어 있으며, 2장에서는 탐지거리 계산을 위해 사용한 소나 방정식과 각 요소를 알아보고 측정된 환경 요소를 이용하여 전달손실을 계산하는 프로그램 모델인 RAM에 대하여 설명하였다. 3장에서는 2장에서 언급된 전달손실 모델에서 계산된 음압, 그리고 소나방정식으로부터 계산된 신호이득을 이용하여 탐지확률을 구하고 탐지거리를 추정하는 이론에 대해 기술하였다. 4장은 2장과 3장의 이론을 바탕으로 Down slope 환경과 Up slope 환경에서 400Hz와 50Hz의 주파수를 사용하여 표적의 깊이를 아는 경우와 모르는 경우에 대하여 탐지확률과 탐지거리를 계산하고 비교하였으며, 이를 바탕으로 피탐지확률을 최소화시키는 깊이에 대해서 알아보았다. 5장에서는 본 연구에 대한 요약으로 결론을 맺었다.

2. 소나방정식

2.1 음원준위(Source Level, SL)

능동소나에서의 음원준위는 입력된 힘과 전기적 에너지가 음향 에너지로 전환될 때의 효율성, 그리고 빔에 음이 집중되는 것으로 인한 방향성이득에 관계될 때 음원 준위는 다음과 같이 표현된다.

$$SL = 171 + 10\log P + DI \quad (2-1)$$

여기서, $10\log P$ 는 Power level로서 단위는 dB re 1W이다. DI 는 송신방향성이득으로서 빔의 세기를 빔패턴 축의 한 점에서 측정한 값에 전방향으로 송신할 때의 세기로 나누어 log크기로 환산한 값이다. 그러므로 전방향음원일 경우 송신방향성이득은 0이다. 본 논문은 수동소나시스템만을 고려하므로 음원준위는 표적의 방사소음준위가 해당된다.

2.2 전달손실(Transmission Loss, TL)

일반적으로 전달손실은 음파가 구형 전달 혹은 원통형 전달의 형태로 진행되는 동안 기하학적 확산손실(geometrical spreading loss)로 발생하며, 그리고 음파가 해수를 통해서 진행될 때 해수의 점성(viscosity)으로 발생하는 체적 흡수손실(volumetric absorption loss), 그리고 해수 중의 생물, 해수면 암석이나, 구조물등과 부딪쳐 산란하면서 발생하는 손실인 산란손실(scattering loss) 등의 형태로 발생한다. 이렇게 복잡한 해양환경에서 전달손실을 구하는 것은

쉬운 일이 아니다. 따라서 전달손실을 계산하기 위해서 해양환경을 몇 가지의 가정으로 단순화시킨 후 음속 및 Bathymetry와 같은 환경정보와 표적과 센서에 관한 정보 등을 입력하여 탐지해역의 전달손실을 계산하는 수치모델이 이용된다.

해저면의 형상과 해류의 흐름이 복잡한 해양환경에서 수치적으로 음파 전달경로 및 세기를 예측하기 위해 포물선 방정식(parabolic equation)을 바탕으로 한, 거리 종속 모델인 RAM(Range dependent Acoustic Model)[4]을 사용하여 전달손실을 계산하였다. 일반적으로 포물선 방정식 모델은 거리 종속 해양환경에서 타원형 방정식인 Helmholtz 방정식을 전진파향과 후진파향을 분리한 후 전진파만을 취한 포물선 형태의 편미분 방정식으로부터 해를 구하는 수치모델이다.

2.2.1 파동방정식

해양에서 적용되는 이론은 운동방정식, 연속방정식 및 상태방정식에 의해 유도되는 선형파동방정식(linear wave equation)이며, 아래와 같이 표현된다.

$$\nabla^2\Phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} \quad (2-2)$$

여기서, ∇^2 는 Laplacian operation, Φ 는 Potential 함수, c 는 음속(sound velocity), t 는 시간이다. 식(2-2)의 조화해는 다음과 같이 가정한다.

$$\Phi = \phi e^{-i\omega t} \quad (2-3)$$

여기서, ϕ 는 시간독립인 Potential 함수, w 는 음원의 각주파수(angular frequency)이다. 따라서 식(2-2)를 (2-1)에 대입하여 정리하면 식(2-4)와 같이 표현된다.

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (2-4)$$

여기서, k 는 파수(wave Number)[6]이며, 식(2-4)를 원통좌표계로 변환하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k^2(z) \phi = 0 \quad (2-5)$$

식(2-5)는 Helmholtz(elliptic reduced)파동방정식이라고 부른다. 이 방정식은 편미분 방정식으로 간단한 경우에만 해석적인 방법에 의해 풀이가 가능하며, 실제 적용시에는 수치적인 방법에 의해 접근해야한다.

2.2.2 포물선 방정식

포물선 방정식은 균일한 밀도의 원통형 좌표계와 Time dependence $\exp(-i\omega t)$ 의 Harmonic source에 대한 Helmholtz 방정식에서 출발한다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 p = 0 \quad (2-6)$$

여기서, $p(r, z)$ 는 음향파위에 해당되며, $k_0 = w/c_0$ 는 기준파수(reference

wavenumber)이고, $n(r, z) = c_0/c(r, z)$ 는 굴절지수이다. φ 좌표에서는 독립적이기 때문에 논문에서는 방위 대칭(azimuthal symmetry)을 가정한다.

대부분의 포물선 방정식 음파모델은 Tappert가 처음 제안한 방법에 기초하고 있으며 전통적인 포물선 방정식 접근방법은 식(2-6)의 해를 다음과 같이 가정한다.

$$p(r, z) = \psi(r, z)H_0^{(1)}(k_0 r) \quad (2-7)$$

여기서, $\psi(r, z)$ 는 음원으로부터 거리(r)의 완만한 함수이며, 거리(r)는 주로 Hankel function $H_0^{(1)}(k_0 r)$ 에 영향을 미친다. 또한 거리가 파장에 비해 상대적으로 매우 크다고 가정하고($k_0 \gg 1$), 식(2-7)을 식(2-6)에 대입하면 다음과 같은 단순화된 타원형 파동 방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + 2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2 (n^2 - 1) \psi = 0 \quad (2-8)$$

이제 envelope function $\psi(r, z)$ 이 매우 완만하다고 가정하면,

$$\left| \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} \right| \ll \left| 2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right| \quad (2-9)$$

식(2-9)는 Hankel function이 거리에 따른 영향을 주로 받을 때, 즉 수평방향으로 전파하는 경우에 성립한다. 이와 같은 가정을 Small-angle approximation 이라하며 결국 Tappert의 표준 포물선 방정식은 다음과 같다.

$$2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_0^2 (n^2 - 1) \psi = 0 \quad (2-10)$$

Helmholtz 방정식과 비교하여 이 식의 장점은 식(2-6)이 공간좌표상의 모든 지점에서 동시에 풀어야하는 타원형 편미분 방정식인데 반하여 식(2-10)은 전진적인 방법(marching scheme)에 의해 해를 구할 수 있는 포물선 편미분 방정식이다. 그러나 Small-angle approximation으로 인하여 전파각이 $10 \sim 20^\circ$ 보다 클 경우에는 상당한 오차가 발생하게 된다. 또 다른 오차 원인은 음원의 상태가 유도과정에서 누락되는 경우도 있어 이 경우 다른 수치 모델에 의한 초기해를 필요로 하게 된다.

한편, 보다 큰 전파각도를 갖는 방정식을 공식화하고 수치적으로 풀 수 있는데, 이 방정식은 Operator formalism을 기초로 하며, 미 해군에 의해 개발된 NORDA Model에서 사용되었다. 우선 다음과 같이 두 개의 연산자를

$$P = \frac{\partial}{\partial r} \quad , \quad Q = \sqrt{n^2 + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}} \quad (2-11)$$

와 같이 정의하면 식(2-8)의 타원형 파동방정식을 식(2-12)와 같이 표현할 수 있다.

$$[P^2 + 2ik_0 P + k_0^2 (Q^2 - 1)] \psi = 0 \quad (2-12)$$

이 식을 방출파 성분과 후진파 성분의 두 항으로 인수분해하면, 식(2-13)과 같이 표현할 수 있다.

$$(P + ik_0 - ik_0Q)(P + ik_0 + ik_0Q)\psi - ik_0[P, Q]\psi = 0 \quad (2-13)$$

아래의 식(2-14)에서

$$[P, Q]\psi = PQ\psi - QP\psi \quad (2-14)$$

연산자 P 와 Q 는 $n \equiv n(z)$ 인 거리독립적인 환경에 대하여 상호 교환적이며, 식(2-13)에서 마지막 항은 zero이다. 이때 $n(r, z)$ 인 거리종속을 가정하면, 충분하지 않지만 상호교환적인 항을 무시할 수 있다. 단지 방출파 성분만을 선택하면 아래와 같은 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} P\psi &= k_0(Q - 1)\psi \\ \text{or} & \\ \frac{\partial\psi}{\partial r} &= ik_0 \left(\sqrt{n^2 + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}} - 1 \right) \psi \end{aligned} \quad (2-15)$$

이 방정식은 순수한 한 방향(one-way) 파동 방정식이며, 거리독립적인 환경에 대하여 Far-field를 가정했을 때 정확하다. 편의상 기호 ϵ, μ, q 를 다음과 같이 정의하고 식(2-11)의 Square-root operator Q 를 식(2-16)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\epsilon = n^2 - 1, \quad \mu = \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad q = \epsilon + \mu, \quad Q = \sqrt{1 + q} \quad (2-16)$$

위의 식(2-16)을 Taylor series로 전개하면 식(2-17)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\sqrt{1+q} = 1 + \frac{q}{2} - \frac{q^2}{8} + \frac{q^3}{16} - \dots \quad (2-17)$$

위의 식이 수렴하기 위한 조건은 $|q| < 1$ 이어야 한다. 연산자 q 는 단지 음원의 방사각도만의 함수이므로, 따라서 q 는 수평면부근 전파에 대해서는 작은 값을 갖는다. 만약 식(2-17)에서 처음 두 항만을 남겨둔다면 식(2-18)과 같은 Square-root operator의 가정된 형태를 얻는다.

$$Q \simeq 1 + \frac{q}{2} = 1 + \frac{n^2 - 1}{2} + \frac{1}{2k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2-18)$$

식(2-18)을 식(2-15)에 대입하면, 식(2-19)와 같은 표준 포물선 방정식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{ik_0}{2} \left(n^2 - 1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi \quad (2-19)$$

위의 식은 Square-root operator Q 의 Series expansion을 기초로 유도되며, wide angle에서도 적용할 수 있는 포물선 방정식 근사법으로 공식화 할 수 있게 하였다. 실제로 Taylor series에서는 고차항을 남겨두어야 하지만 p 항이 증가 할수록 계산에 많은 어려움이 따른다. 반면에 Square-root operator에 대해 유리함수 근사법(rational function approximation)은 매우 효율적인데, 이 근사법의 일반적인 형태는 식(2-20)과 같다.

$$\sqrt{1+q} \simeq \frac{a_0 + a_1q}{b_0 + b_1q} \quad (2-20)$$

여기에서, 각 계수들은 주어진 각도 간격에 대해 오차를 최소화하도록 선택될 수 있다. 이러한 유리함수들은 학자들에 따라 조금씩 상이한데 구체적으로 살펴보면, 우선 Tappert는 $a_0 = 1$, $a_1 = 0.5$, $b_0 = 1$, $b_1 = 0$ 으로 근사하여 식(2-21)과 같이 표현하였으며, Claerbout는 $a_0 = 1$, $a_1 = 0.75$, $b_0 = 1$, $b_1 = 0.25$ 로 근사하여 식(2-22)와 같이 표현하였고, Green은 $a_0 = 0.99987$, $a_1 = 0.79624$, $b_0 = 1$, $b_1 = 0.60102$ 로 근사하여 식(2-23)과 같이 표현하였다.

$$\sqrt{1+q} \simeq 1 + 0.5q \quad (\text{Tappert}) \quad (2-21)$$

$$\sqrt{1+q} \simeq \frac{1 + 0.75q}{1 + 0.25q} \quad (\text{Claerbout}) \quad (2-22)$$

$$\sqrt{1+q} \simeq \frac{0.99987 + 0.79624q}{1 + 0.60102q} \quad (\text{Green}) \quad (2-23)$$

위의 세 식을 고찰해 보면 Tappert와 Claerbout의 두 식은 각도 증가에 따라 위상오차(Phase error)가 증가한다는 것을 후에 알게 되었다. 그리고 Green의 식은 Claerbout가 사용한 계수의 값과 유사하나 각도 $0 \sim 40^\circ$ 에서 위상오차가 최소가 된다. 그러나 최근에 사용되는 Pade series expansion은 위상오차를 최소화하는 최적의 방법은 아니지만 주 전파방향에서는 매우 정확하고 수치적으로 적용이 용이하기 때문에 각광을 받고 있다. Bamberger에 의해 제안되었고 Collins에 의해 처음으로 적용되었다. Pade series expansion을 기초로 한

very wide angle 포물선 방정식의 일반적인 형태는 아래 식(2-24)와 같다.

$$\sqrt{1+q} = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{a_{j,m}q}{1+b_{j,m}q} + Q(q^{2m+1}) \quad (2-24)$$

여기서, $a_{j,m}$, $b_{j,m}$ 은 아래와 같이 표현할 수 있으며,

$$a_{j,m} = \frac{2}{2m+1} \sin^2\left(\frac{j\pi}{2m+1}\right)$$

$$b_{j,m} = \cos^2\left(\frac{j\pi}{2m+1}\right)$$

이때 Pade series sum으로부터 다섯 항을 포함시킨다면 주 전파방향에 대하여 $\pm 60^\circ$ 까지는 매우 작은 위상오차를 갖게 되고, 더 많은 항을 포함시킨다면 거의 $\pm 90^\circ$ 까지 확장이 가능하다.

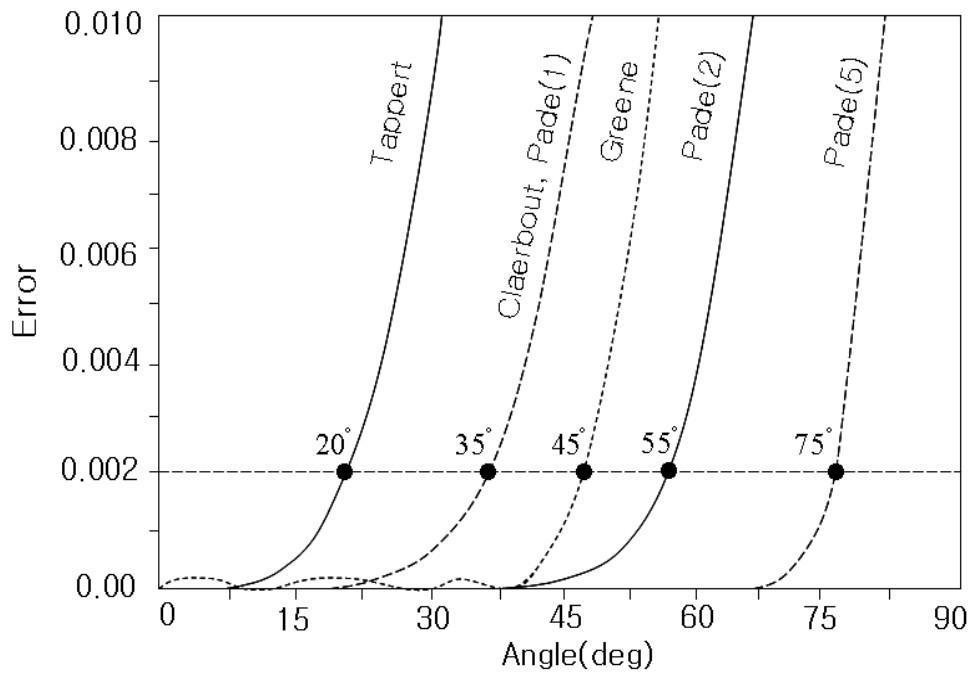


그림2.1 각 포물선 방정식에서의 위상오차 대 전파각도
(허용오차 0.002)

2.2.3 거리종속 음향모델

거리종속 음향모델은 광범위한 거리스텝을 허용하고 계속해서 발전해온 가장 효율적인 PE 알고리즘인 Split step pade solution을 바탕으로 개발되었다. 거리 종속적이라는 것은 거리에 따라 변하는 음향적 요소들로서 에너지 보존을 수정 적용함에 따라 정확하게 다루어지며, 초기상태는 PE 기법을 바탕으로 정확하고 효율적으로 접근하는 Self starter에 의해 구성된다. 포물선 파동방정식의 수치적인 해는 아래 그림에서 볼 수 있듯이 방정식의 3개의 대각선 시스템(tridiagonal system)을 반복적으로 해결하는 것을 포함한다. RAM의 이러한 구성요소는 가변 수심을 포함하는 문제에 효율적인 특별한 소거기법을 사용함으로써 연산횟수를 최소화하여 최적화 시킨다. Split Step Pade 알고리즘은 유리함수 근사법을 기초로 하며, 유리근사의 세 대각선 시스템들은 효율적으로 중요한 이득을 얻기 위해 평행하게 해결된다.

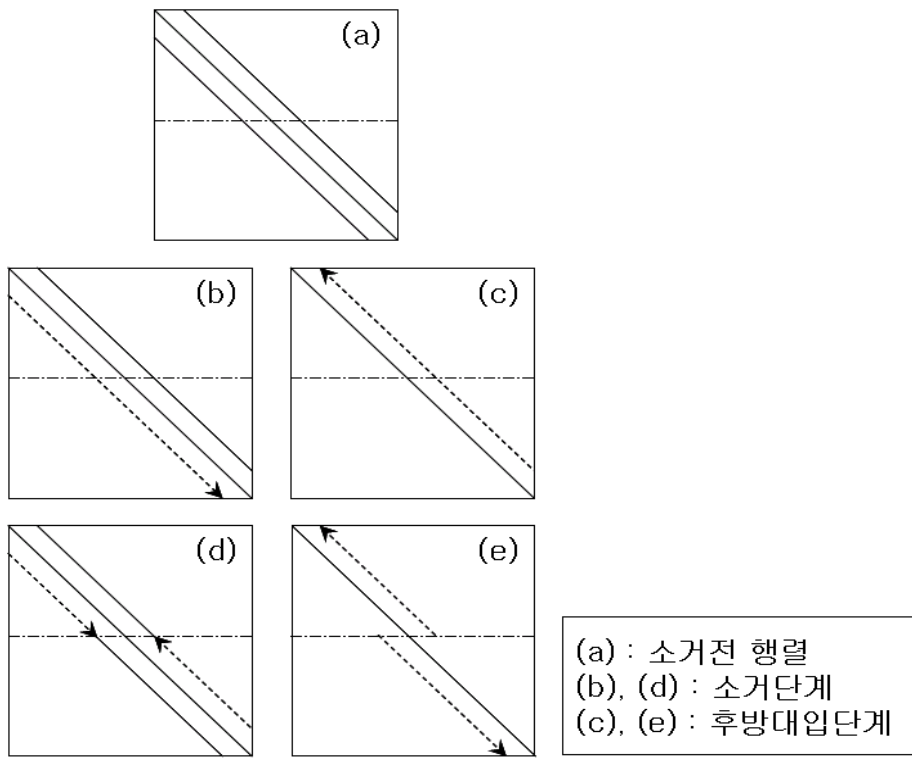


그림2.2 사선 시스템의 해법

2.2.4 수치해석 기법

수중음향에서 매질과 경계들은 시 공간적으로 다양하게 변화한다. 음파의 전파는 음압의 불안정 또는 해양을 따라 이동하는 음장에 의하여 나타나고, 이것은 음속이 광학에서의 굴절지수와 같은 역할을 할 때 파동방정식 또는 Helmholtz 방정식을 만족한다. 음속은 매일의 날씨변화 그리고 계절적인 변화에 의해 영향을 받고 온도, 압력, 염분의 함수로서 변화되며, 여기에 수심, 거리, 수평각, 그리고 시간의 함수로서 변화된다. 음파전달의 요인은 음원에서 발생된 음파가 해수를 통해서 전달될 때의 감쇠, 해저면과 해수면과의 반사, 분산등이 있다.

해양환경에서 파동방정식을 수치적으로 풀기 위한 기법은 여러 가지가 있으며, 각각의 기법들은 기하학적인 가정, 이론적인 배경, 적용범위가 있다. 여기서, 적용범위를 구분하면 대표적으로 음선이론(ray theory)과 파동이론(wave theory)으로 나눌 수 있으며, 해양의 환경조건에 따라서 거리독립(range independent)이론, 거리종속(range dependent)이론으로 나눌 수 있다. Helmholtz 방정식에 대한 수치적 방법으로는 음선이론(wave theory), 정상모드(normal mode), 다중경로확장(multipath expansion), 파수적분법(wavenumber integration), 포물선 방정식(parabolic equation)이 있으며, 표 2.1에서 각 음장모델링의 장단점을 간략하게 비교하였다.

수치해석 기법	장 점	단 점
음선이론 (Ray Theory)	<ul style="list-style-type: none"> • 음파전달 메카니즘의 시각적인 이해가 용이 • 경계조건을 적용하기 용이 • 고주파영역에서 빠른 계산 수행 	<ul style="list-style-type: none"> • 음파의 산란이나 회절 문제를 다루기 곤란
정상모드 (Normal Mode)	<ul style="list-style-type: none"> • 형태상으로 완전한 해를 계산 • 모든 음속구조상에서 계산 가능 • 어떤 형태의 음원에서도 적용가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 수학적 해의 이해가 곤란 • 실제적인 경계조건을 다루기 위해서 모델링이 필요 • 주파영역 계산에 많은 시간이 요구
다중경로확장 (Multipath Expansion)	<ul style="list-style-type: none"> • 심해역, 고주파영역에서 정상모드법에 비해 계산이 빠르고 정확도가 높음 • 수렴구획이나 해저면 반사에 대한 모드 분리 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 인위적인 모드제한으로 도파관에서의 누출에 대한 취급이 불가 • 해저면 이하의 영역에서 음파전달이 존재하는 경우 계산이 부정확성을 가짐
파수적분법 (Wavenumber Integration)	<ul style="list-style-type: none"> • 음원에서 근접한 지역까지 완전 해를 계산 • 상호작용이 많은 환경에서 정확한 계산이 가능 • 타 모델의 검증용으로 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 탐지환경이 거리 종속 환경일 경우 두 가지 이상의 수치모델을 혼합한 Hybrid 방법을 이용해야 적용가능
포물선 방정식 (Parabolic Equation)	<ul style="list-style-type: none"> • 복잡한 해양환경에 대해 수치적용이 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 기하급수적 인계산량 증가로 인해 원거리(far field)와 주파수에서 제한적 사용 • 근거리(near field)에서 부정확성을 보임 • 위상오차 누적을 가짐

표 2.1 전달손실모델의 특성

2.3 소음준위(Noise Level, NL)

수음준위는 크게 주변소음과 자체소음 두 가지로 구분된다. 이를 구분하는 것은 소나를 이용하는 선박의 속력이며, 20kts까지는 주변소음 그 이상의 속력에서는 자체소음으로 간주한다. 10Hz에서 100kHz범위의 주변소음은 타 선박에 의한 소음과 바람에 의한 해수면 상태에 따른 소음의 조합으로 나타나는데 대표적 실험치로서 Wenz곡선이 이용된다. 이 곡선은 심해에서의 주변소음 준위로서 주파수와 타 선박의 통행량, 해수면 상태의 함수로서 구성된다. 주변소음준위는 통행선박, 비, 바람 얼음 등의 소음들을 Power sum으로서 계산된다. 다음으로 자체소음은 선박의 기계적 소음과 추진소음, 유체소음이 있는데 각 선박들은 고유의 자체소음 준위를 가진다. 따라서 소음준위는 주변소음과 자체소음의 Power sum에 의한 dB값으로 계산되며, 본 논문에서는 주변소음만을 계산에 포함하였다.

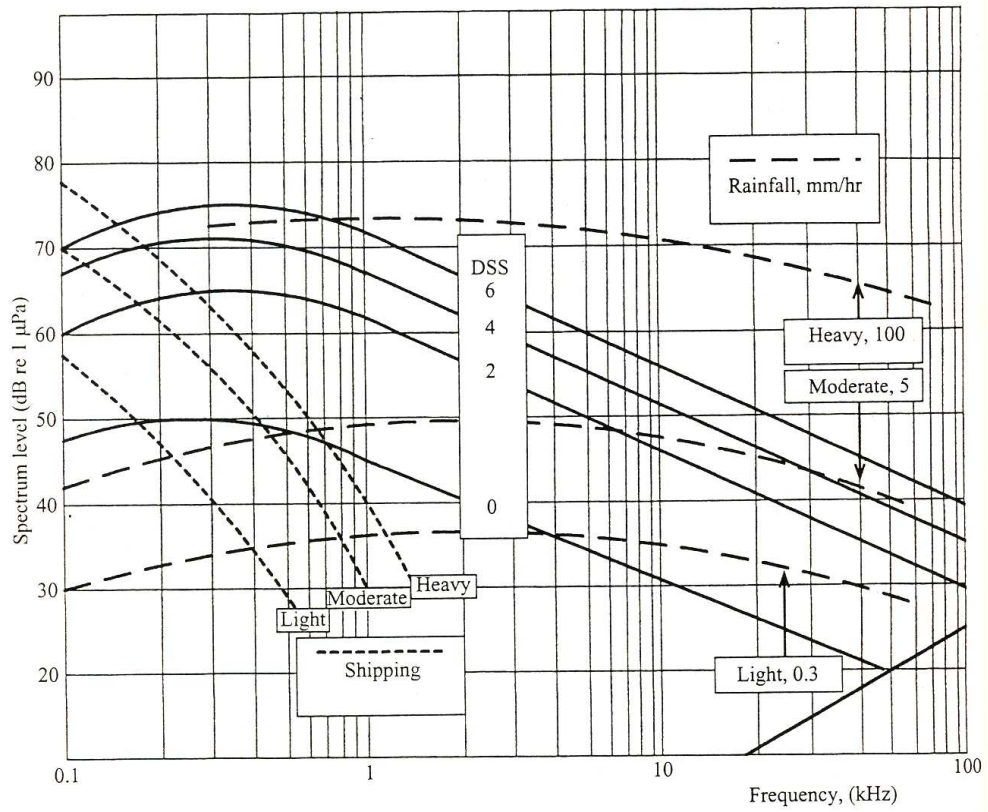


그림 2.3 심해수중소음의 평균스펙트럼

2.4 지향지수(Directivity Index, DI)

지향지수는 완전하게 일치하는 무지향의 평면파(plane wave), 등방성의 소음, 단위 입체각당 Noise power가 전 방향에서 1로 동일할 때 감소한 배열 이득치(array gain)의 양을 말하며, 선배열소나(line array)에서의 지향지수(DI)는 아래의 식과 같이 표현된다.[3]

$$DI = 10 \log \left[\frac{2L}{\lambda} \left\{ \frac{2}{\pi} Si \left(\frac{2\pi L}{\lambda} \right) + \frac{\lambda}{\pi^2 L} \left(\cos \left(\frac{2\pi L}{\lambda} \right) - 1 \right) \right\}^{-1} \right] \quad (2-25)$$

여기에서 L 은 선배열 소나의 길이이며, λ 는 파장이다. 또한 $Si \left(\frac{2\pi L}{\lambda} \right)$ 는 Sine - integral 함수이며, 다음과 같이 정의된다.

$$Si(u) = \int_0^u \frac{\sin x}{x} dx \quad (2-26)$$

이때, 소나의 길이가 파장에 비해 상당히 크다고 ($L \gg \lambda$)가정한다면, 지향지수는 다음과 같이 나타낼 수 있다. [3]

$$DI = 10 \log \frac{2L}{\lambda} \quad (2-27)$$

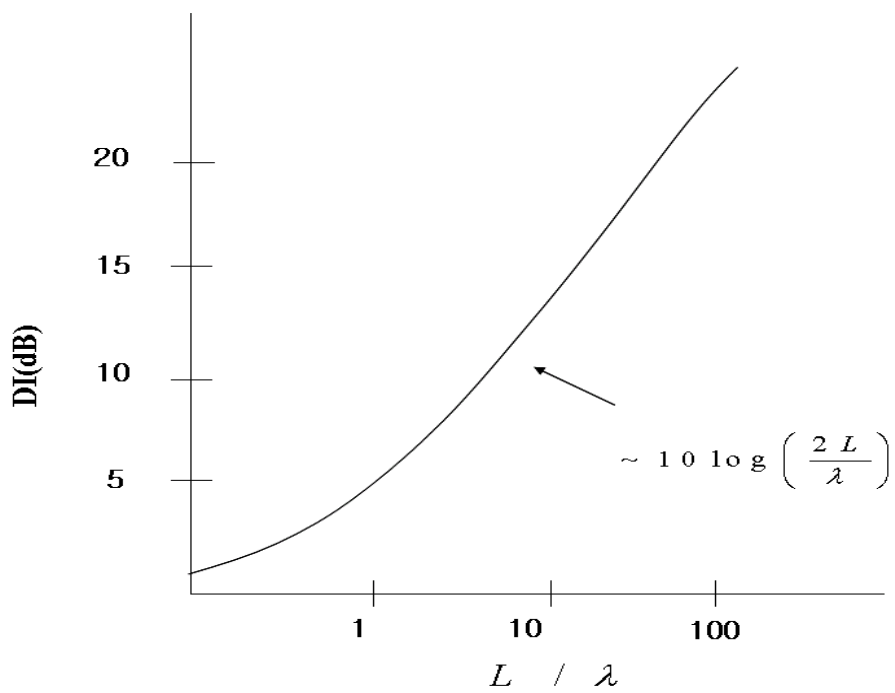


그림2.4 선배열 소나의 지향지수

2.5 탐지 문턱(Detection Threshold, DT)

수동 탐지 체계에서 Detection threshold는 탐지 결정을 위해 특정하게 주어진 준위를 만족시키는 수신 빔폭에서의 Signal power(S)대 수신단에서 측정된 1Hz band에서의 Noise power(N_0)의 비율로 표현되는데, 다음의 식과 같이 정의 된다.[3]

$$DT = 10 \log \frac{S}{N_0} \quad (2-28)$$

제약조건이 Gaussian noise, $S/N \ll 1$, 샘플의 규모가 크고, 적분시간(T) < 신호지속시간(t)일 경우 Detection index는 식(2-29)와 같이 표현된다.

$$d = wt \left(\frac{S}{N} \right)^2 \quad (2-29)$$

여기에서, w : 대역폭, S : 대역폭이 w 일 때의 Signal power
 N : 대역폭이 w 일 때의 Noise power

$$\frac{S}{N_0} = \frac{Sw}{N} = \left(\frac{dw}{t} \right)^{1/2} \quad (2-30)$$

여기서, 탐지문턱(DT)은 식(2-31)과 같이 표현된다.

$$DT = 5 \log \frac{dw}{t} + \left| 5 \log \frac{T}{t} \right| \quad (2-31)$$

Detection threshold를 계산하기 위해서는 원하는 신호를 탐지할 탐지확률 (P_D)과 원하는 신호가 아닌데 원하는 신호인 것처럼 탐지할 확률, 오탐지확률 (P_{FA})이 필요하다. 탐지확률과 오탐지확률이 결정되어지면, 그림(2.5)의 Receiver operating characteristic(ROC)곡선을 이용하여 Detection index를 결정한다.[4]

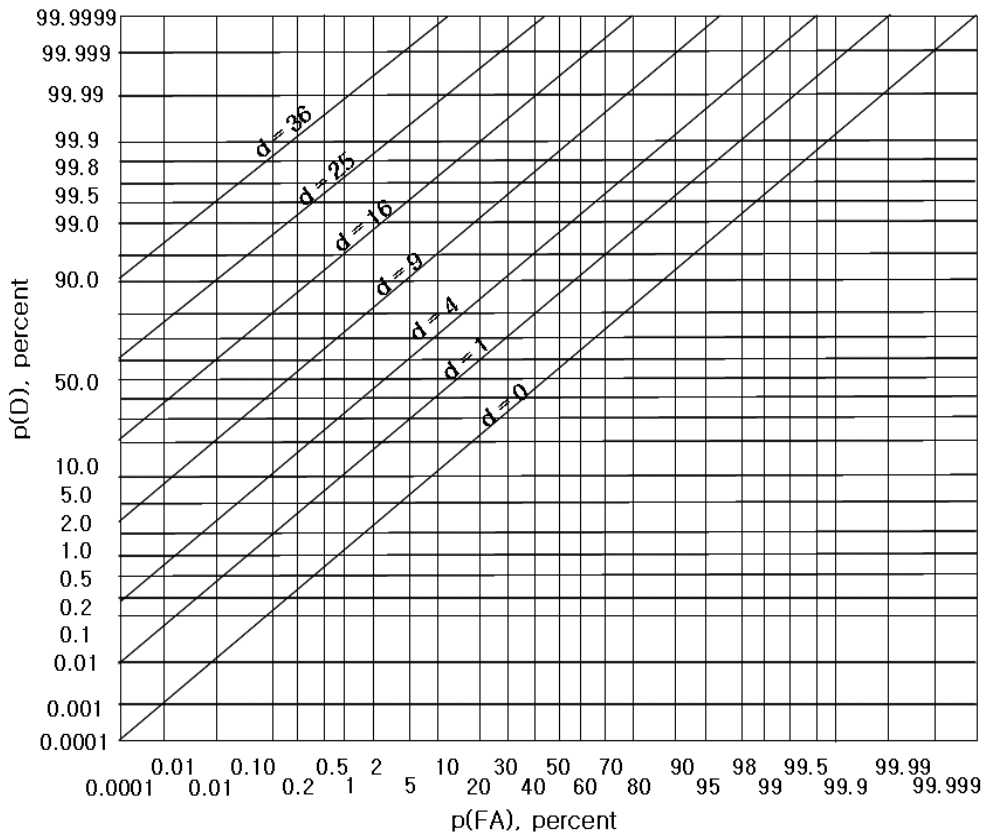


그림2.5 ROC 곡선

3. 피탐지거리 계산을 위한 알고리즘

특정 깊이에서 피탐지거리를 계산하기 위해서는 FOM(Figure Of Merit)을 구해야하는데 수동소나체계에서 정의되는 FOM은 탐지해역에서 측정되는 최대 전달손실이며, 능동소나체계에서는 탐지확률이 50%일 때의 전달손실로 정의 된다. 본 논문에서는 수동소나체계에 한정되므로 전자만을 고려하며, 식(3-1)과 같이 표현된다.

$$FOM = SL - NL + DI - DT \quad (3-1)$$

SL 은 음원준위(source level)로서 단위거리에서의 음압준위(pressure level)에 해당된다. NL 은 주변소음과 자체소음으로 구분되는 소음준위(noise level)이다. DI 는 지향지수(directionality index)이며, DT 는 측정된 값이 탐지신호인지 구분을 하기 위한 기준인 탐지문턱(detection threshold)이다.

식(3-1)에서 계산된 FOM은 전달손실 모델에서 계산된 전달손실(Transmission Loss, TL)과 함께 아래와 같이 계산하여 신호이득(signal excess)을 계산할 수 있다.

$$SE(FOM, r, z_r | z_s) = FOM - TL(r, z_r | z_s) \quad (3-2)$$

여기서, FOM은 음원(표적)과 탐지센서 및 해양의 환경요소가 결정되면 음원준위, 소음준위, 지향지수, 탐지문턱의 요소가 고정된 값을 가지므로 일정하다고 가정한다. 다음으로 전달손실(TL)은 표적의 깊이(z_s), 센서의 깊이(z_r), 음속 분포, 그리고 표적과 센서간의 거리(r)에 의해서 결정된다.

식(3-2)에서 계산된 신호이득을 이용하여 피탐지확률을 구할 수 있는데 단

위 거리에서의 피탐지확률은 식(3-3)과 같이 Log - normal distribution으로 표현된다.

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

여기에서 σ 는 신호이득의 표준편차로서 여러 값에 따라 다양한 곡선으로 나타나는데, 통상적으로 해상시험을 통한 실험값으로 8~9dB 사이의 값을 갖는다.[2] 본 논문은 표준편차를 8dB로 정했다. 그림3.1은 임의의 신호이득에 대한 피탐지확률을 보이고 있다. 신호이득은 거리와 탐지센서 및 표적의 깊이 함수로서 거리와 깊이에 따라 변하게 되며, 이에 따라서 피탐지확률도 변하게 된다.

피탐지거리(Detection Radius, DR)는 표적과 탐지센서의 깊이에서 구한 수심별 피탐지확률을 거리방향으로 적분하여, 아래의 식(3-4)와 같이 표현된다.

$$DR(FOM, z_s|z_r) = \int_0^{\infty} P_D(FOM, r, z_s|z_r) dr \quad (3-4)$$

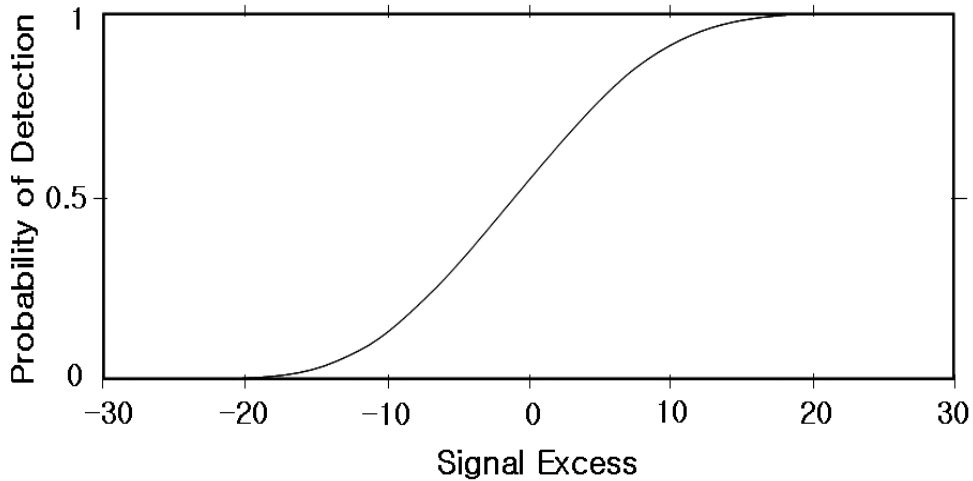


그림3.1 신호이득에 대한 임의의 탐지확률

4. 수치실험

연구 수행을 위해서 탐지하는 센서의 깊이가 알려진 경우와 그렇지 못한 경우 표적에서 탐지센서로 진행 될수록 탐지해역의 수심이 깊어지는 Down slope 환경과 탐지센서로 이동 할수록 수심이 얕아지는 Up slope 환경에서 표적의 위치에 따른 탐지확률을 비교해보고 각 경우에 따라서 탐지확률을 낮추기 위한 연구를 수행하였다.

4.1 센서의 깊이가 알려진 경우

4.1.1 Down slope 탐지 환경

본 연구에서는 피탐지거리에 영향을 미치는 요소 중에서 고정된 센서가 위치한 수심의 음속, 표적과 탐지센서 사이의 해저지형의 경사도가 탐지확률에 미치는 영향을 알아보기 위해 모의실험을 수행하였다. 탐지해역은 거리에 따라 환경요소의 값이 변하는 거리 종속의 환경으로 수심은 500 ~ 1000m에서 거리에 따라 다른 값을 가진다. 해저지질의 밀도는 $1.5g/cm^3$, 감쇠계수 $0.1dB/\lambda$ 저질에서의 음속은 $1600m/s$ 로 가정하였으며, 음향학적 반공간(half space)으로 정하였다. 그림 4.2에서는 탐지환경에 관한 정보를 간략화해서 나타내고 있다. 수치실험을 위해 사용된 음속분포는 혼합층(mixed layer)이 존재하지 않는 전형적인 여름의 음속 분포를 사용하였다. 음속분포의 특징으로는 수심 300m에서 상대적으로 최소의 음속을 가지며, 수심이 증가 될수록 음속이 증가함을 그림 4.3에서 확인 할 수 있다. 수치실험은 탐지거리에 영향을 주는 요인 중에서 음속이 탐지거리에 어떤 영향을 주는지 확인하기 위해 음원이

해수면과 가깝고 음속이 상대적으로 빠른 수심 20m에 위치할 경우와 그와 대조적으로 보다 음속이 느린 수심인 200m에서 그리고 그 중간 깊이인 수심 90m 3가지 경우에 대해서 전달손실 및 탐지거리를 계산하였다.

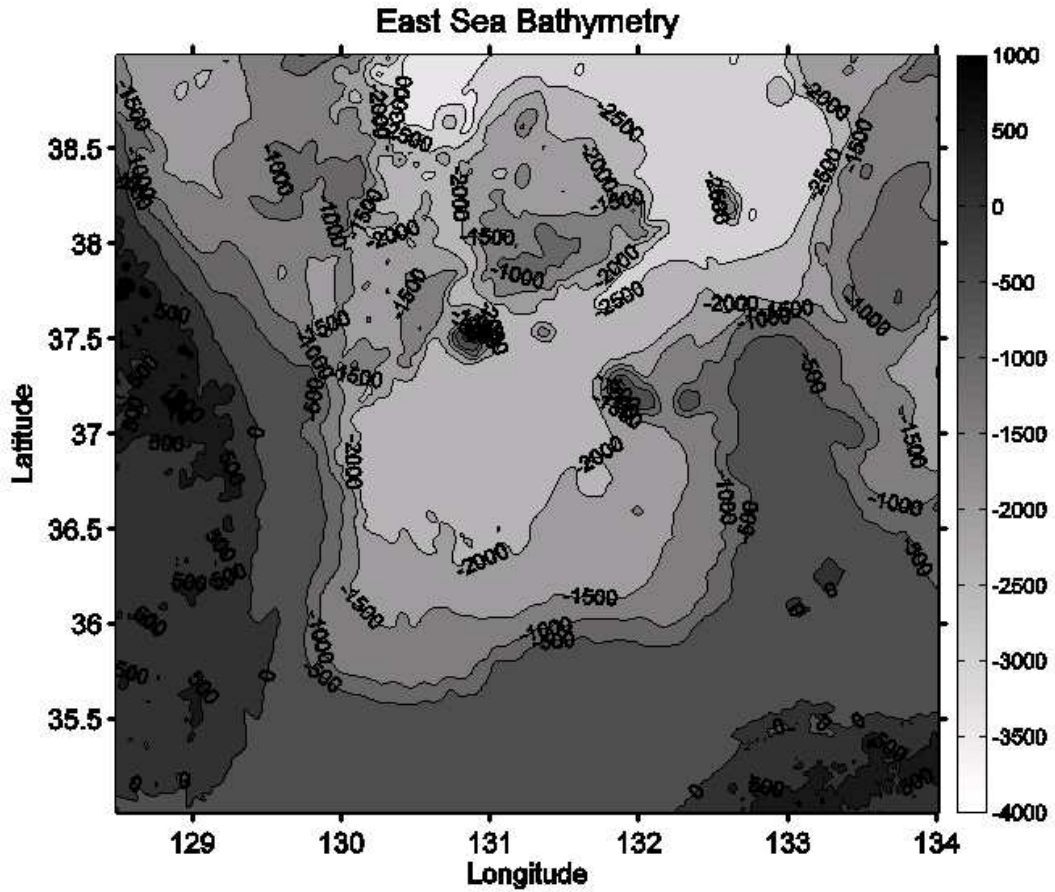


그림4.1 동해해역의 수심정보

Simulation Environment

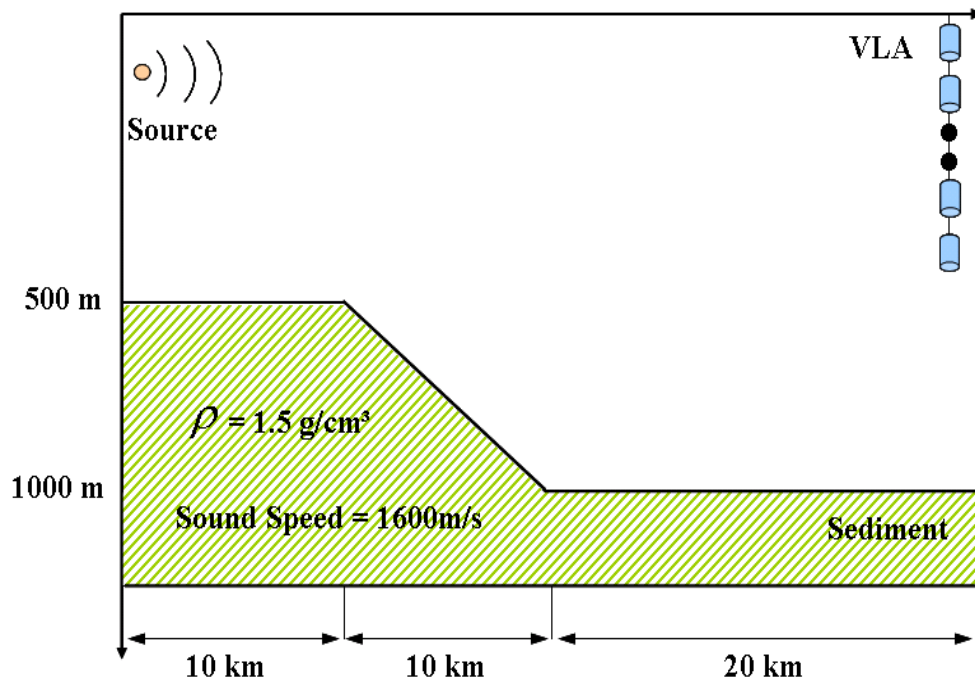


그림 4.2 Down slope 환경의 탐지해역 정보

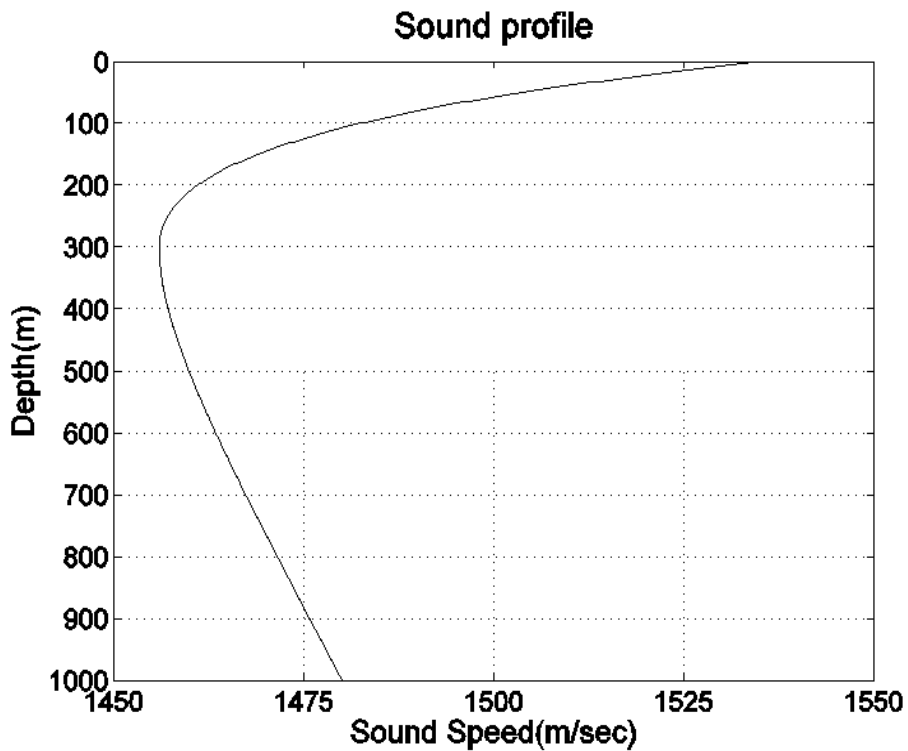


그림4.3 Sound profile

Case1. 400Hz

(가) 전달손실

그림4.4, 4.5, 4.6에서는 400Hz의 주파수에서 음원의 수심이 20m, 90m, 200m로 고정될 때의 전달손실을 나타내고 있다. 음원이 비교적 얕은 수심인 20m, 90m에 위치 할 때 신호의 전달손실을 보여주는 그림4.4, 4.5에서는 방사된 신호가 해저면과 해수면 사이에서 반사를 거듭하며 진행됨을 확인 할 수 있다. 그것은 표적이 위치한 수심의 음속과 그 이외 다른 깊이의 해수의 음속

이 상이하여서 표적에서 발생한 신호가 굴절과 반사를 거듭하면서 진행되는 RSR(Refracted and Surface Reflected)전파를 보이기 때문이다. 이때 음선은 일정한 거리마다 특정 영역에서 모여서 진행되는데 이렇게 음선이 모이는 지점을 수렴지역(convergence zone)이라 한다. 이와 반대로 음선이 도달하지 못하는 영역이 있는데 이곳을 음영지역(shadow zone)이라고 한다. 표적의 위치 파악을 목적으로 하거나, 탐지의 회피를 목적으로 할 경우 탐지해역에서 음영지역을 파악하는 것이 우선적이다.

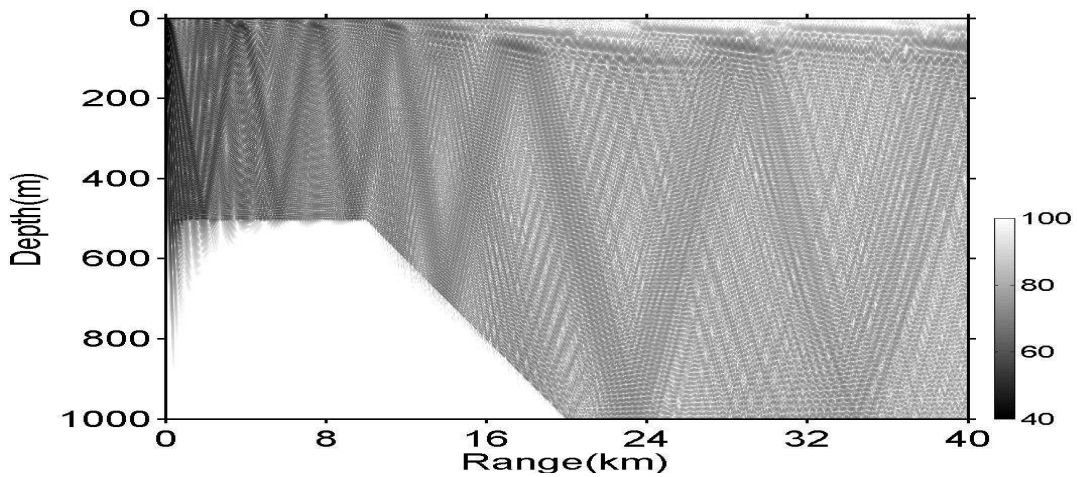


그림4.4 음원수심 20m일 때의 전달손실(400Hz)

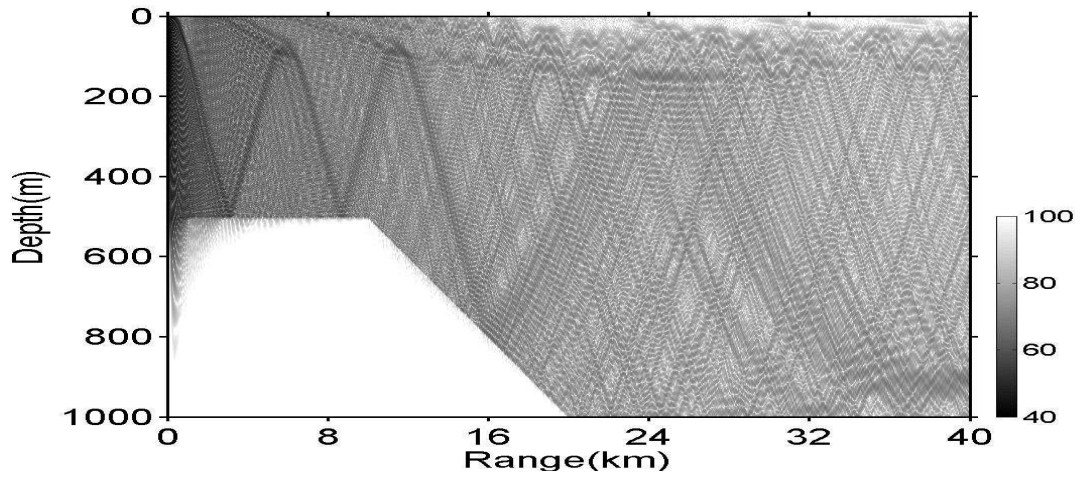


그림4.5 음원수심 90m일 때의 전달손실(400Hz)

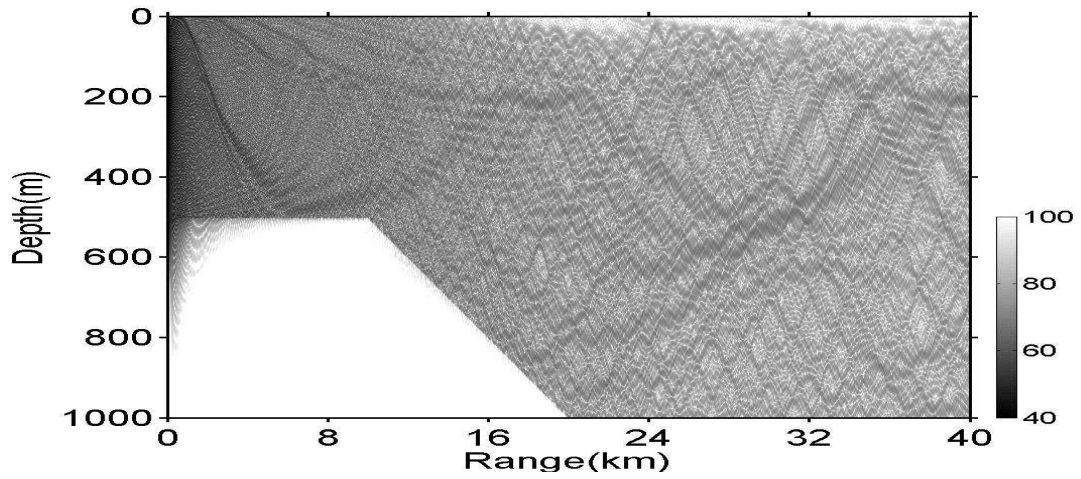


그림4.6 음원수심 200m일 때의 전달손실(400Hz)

(나) 피탐지거리

그림4.4, 4.5, 4.6은 음원이 각각 다른 수심에 있을 때의 전달손실이다. 식 (3-2)에서 신호이득을 구하기 위해서 그림4.7에서 표적(T)은 음원의 역할을 하고 센서(S)는 수신기의 역할을 하고 있다. 일반적으로 탐지의 개념에서는 그림 4.7의 상위 그림처럼 고정된 표적의 깊이에서 발생된 신호를 탐지센서의 깊이 별로 탐지거리를 계산하여야한다. 하지만, 탐지되는 입장인 표적의 경우 하위 그림처럼 고정된 탐지센서에 대해 각 수심별 표적의 피탐지거리를 계산해야한다. 여기에서 가역성의 원리(principle of reciprocity)를 사용하여 계산량을 줄일 수 있는데 가역성의 원리란 표적과 수신기인 탐지센서의 위치를 바꾸어도 전달함수는 같다는 것이다. 즉, $G(\vec{r}_t | \vec{r}_s) = G(\vec{r}_s | \vec{r}_t)$ 와 같이 표현된다. 따라서 그림4.7에서와 같이 가역성을 적용하면 단 한번의 계산으로 고정된 센서에 대한 깊이 별로 움직이는 표적의 음장을 구할 수 있다.

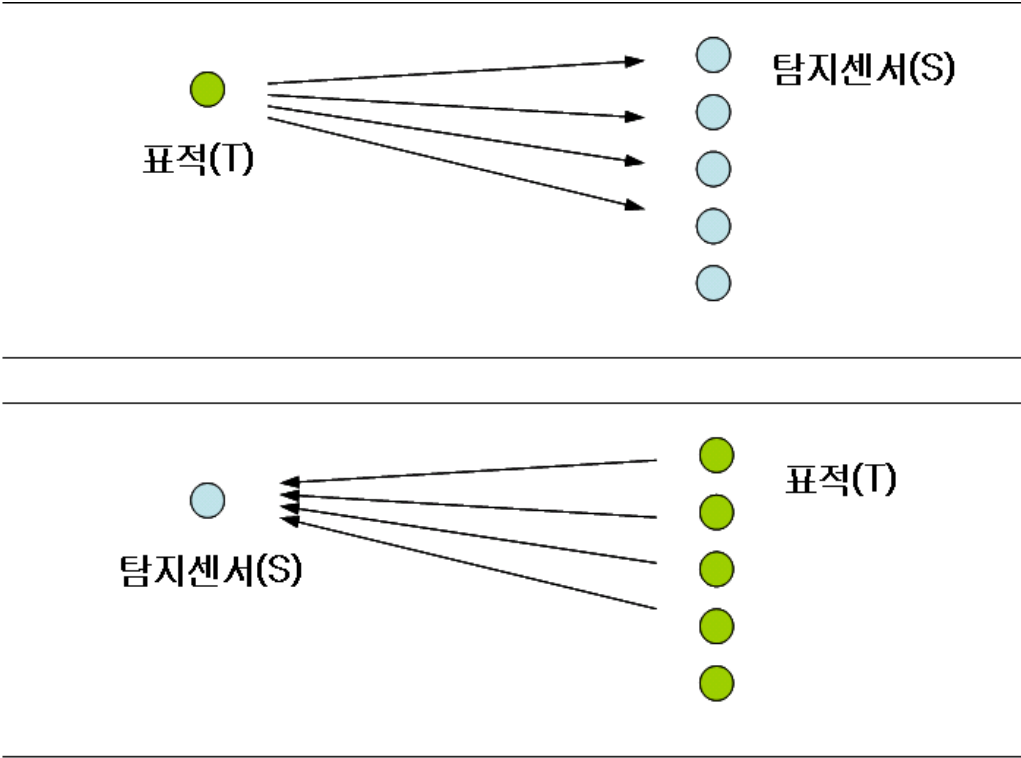


그림4.7 가역성의 원리(principle of reciprocity)

전체 수심에서 잠수함이라는 표적의 가용 깊이를 고려하여 계산을 위해 사용되는 수심을 500m로 제한하였다. 그림4.8, 4.9, 4.10은 센서가 수심이 20m, 90m, 200m에서 고정될 경우 계산을 통해 추정된 피탐지거리를 나타내고 있으며, 탐지거리 그림에서 세로축은 깊이별 각 표적의 수심 정보를 표현하고 있다. 탐지센서의 깊이가 20m일 때는 해수 경계면과의 상호작용과 음속 분포에서 상대적으로 음속이 높은 깊이여서 다른 깊이에 탐지센서가 존재하는 그림 4.9, 4.10과 비교해서 피탐지거리가 전체적으로 낮은 것을 그림 4.8에서 확인할 수 있다. 그러나 그림4.8에서는 표적이 위치하고 있는 수심이 탐지센서와 같은 수심인 20m일 때 그 이외에서 표적이 위치할 때에 비해 상대적으로 탐지거리가 가장 높음을 확인 할 수 있다. 그림에서는 FOM에 따른 피탐지거리를 보여주고 있는데 FOM이 작아질수록 피탐지거리가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그림4.8에서 보면 센서는 20m에 고정되어 있고, 표적의 깊이가 400m일 때 FOM 값이 80에 해당하는 피탐지거리는 40km가 되며, FOM이 70일 경우는 피탐지거리가 24km로 감소됨을 확인 할 수 있다.

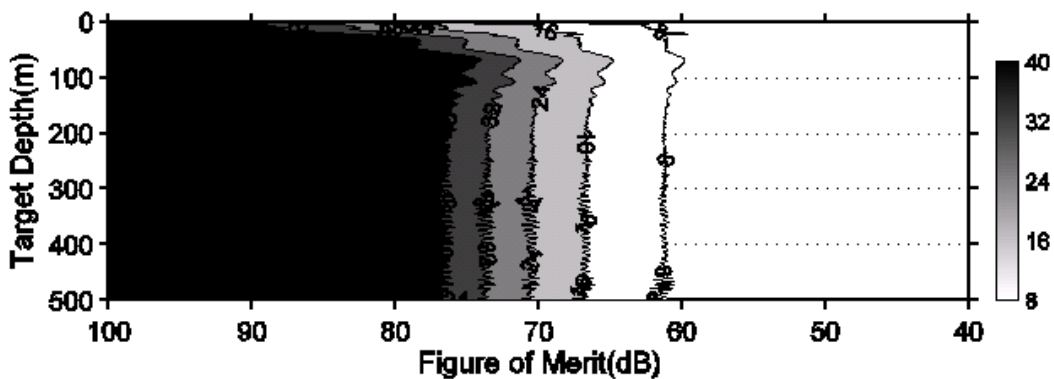


그림4.8 센서수심 20m일 때의 피탐지거리(400Hz)

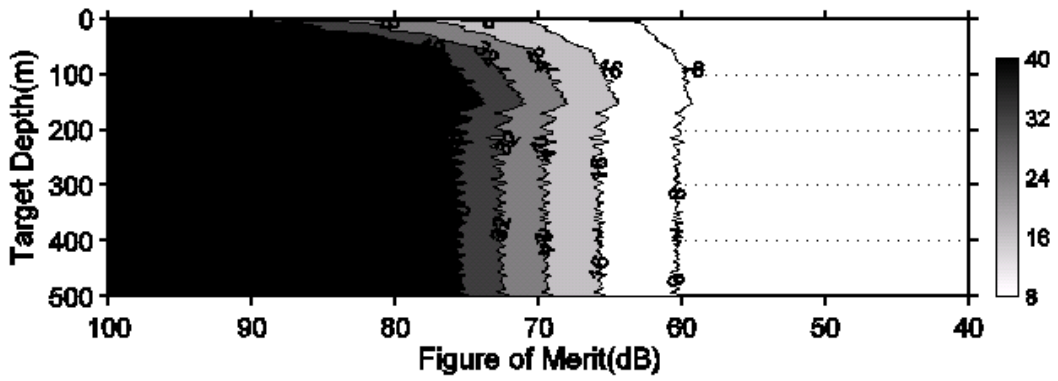


그림4.9 센서수심 90m일 때의 피탐지거리(400Hz)

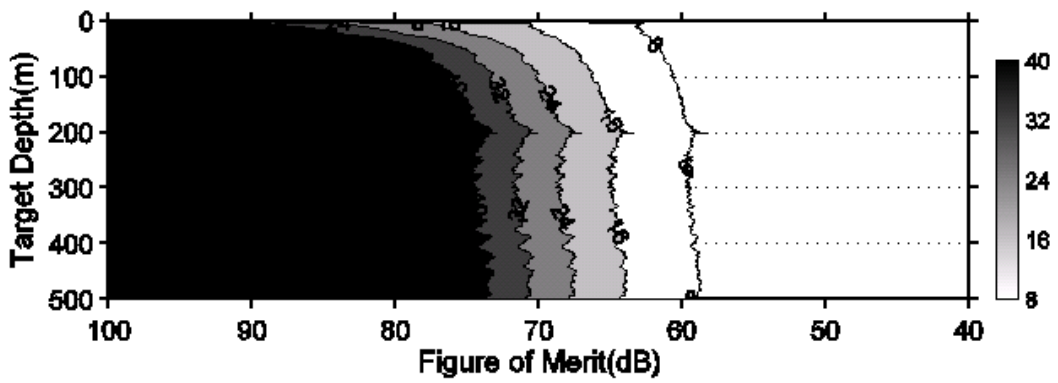


그림4.10 센서수심 200m일 때의 피탐지거리(400Hz)

Case2. 50Hz

(가) 전달손실

400Hz에 비해 상대적으로 저주파인 50Hz의 신호는 해수를 통해 전달되는 과정에서 발생하는 체적흡수손실이 상대적으로 적고 해저바닥에서 발생하는 감쇠가 상대적으로 미약해서 해저바닥에서 굴절된 신호의 에너지가 다시 해수로 돌아와서 음영지역까지 도달된다. 따라서 50Hz신호의 전달손실의 그림에서는 상대적으로 고주파인 400Hz에 비해 음영지역의 비율이 보다 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

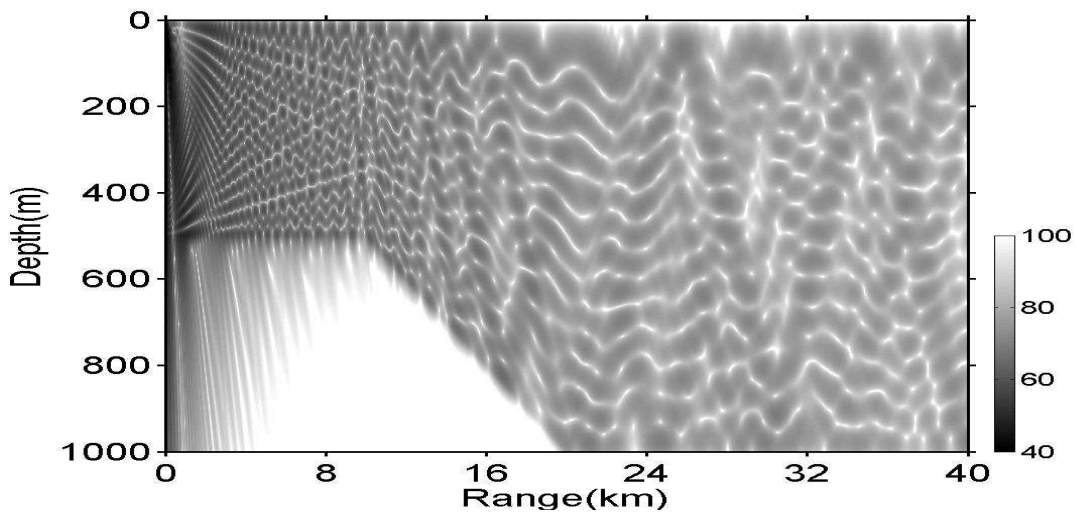


그림4.11 음원수심 20m일 때의 전달손실(50Hz)

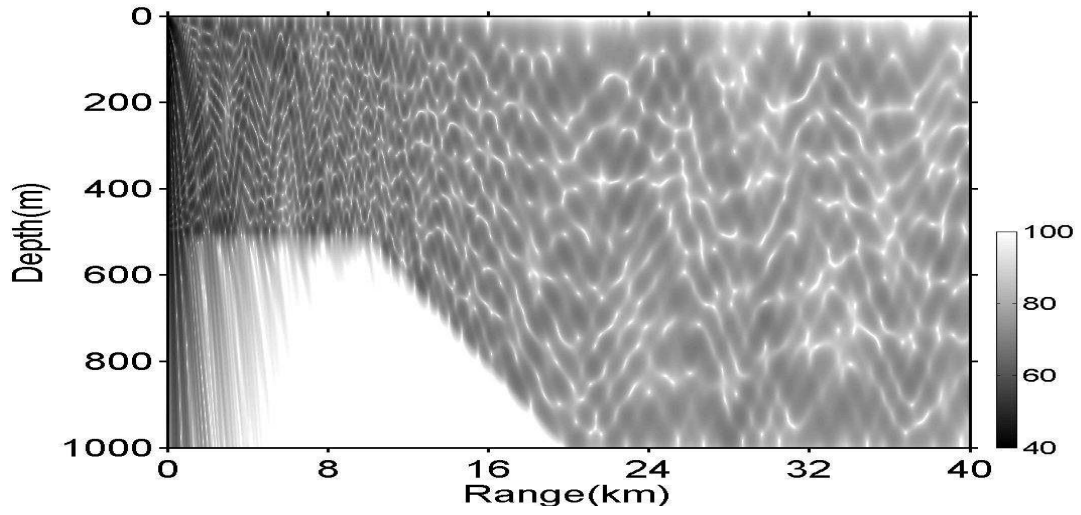


그림4.12 음원수심 90m일 때의 전달손실(50Hz)

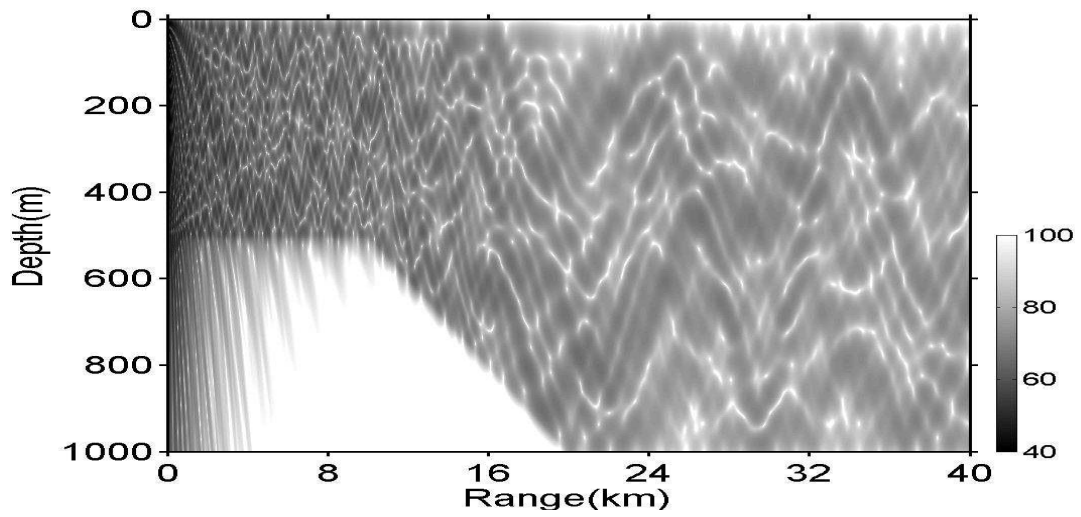


그림4.13 음원수심 200m일 때의 전달손실(50Hz)

(나) 피탐지거리

그림4.15는 그림4.3의 음속 분포에서 수심 20m, 90m에 비해 상대적으로 낮은 음속을 보이고 있는 수심인 200m에서 탐지센서가 위치될 경우 측정된 피탐지거리를 보여 주고 있다. 다른 수심에 비해 음속이 상대적으로 낮아서 음원에서 발생한 신호가 해수면과 해저면에 도달하기 전에 굴절이 발생하여 되돌아간다. 따라서 해수 중에서 발생하는 체적흡수손실 이외 해수면과 해저면에서 발생하는 반사손실이 상대적으로 거의 발생하지 않아서 피탐지거리가 높음을 그림 4.16에서 확인할 수 있다.

저주파인 50Hz의 경우 굴절성과 상대적으로 경계면에서의 감쇠가 적어 해수면과 직접적인 상호작용으로 인해 발생하는 Lloyd mirror pattern[4]의 특성으로 경계면 근처에서의 피탐지거리는 고주파에 비해 보다 높은 값을 보여 주고 있다.

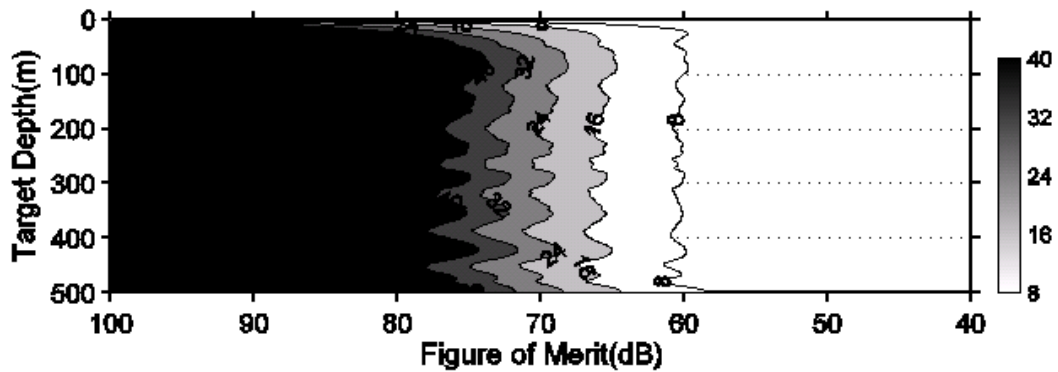


그림4.14 센서수심 20m일 때의 피탐지거리(50Hz)

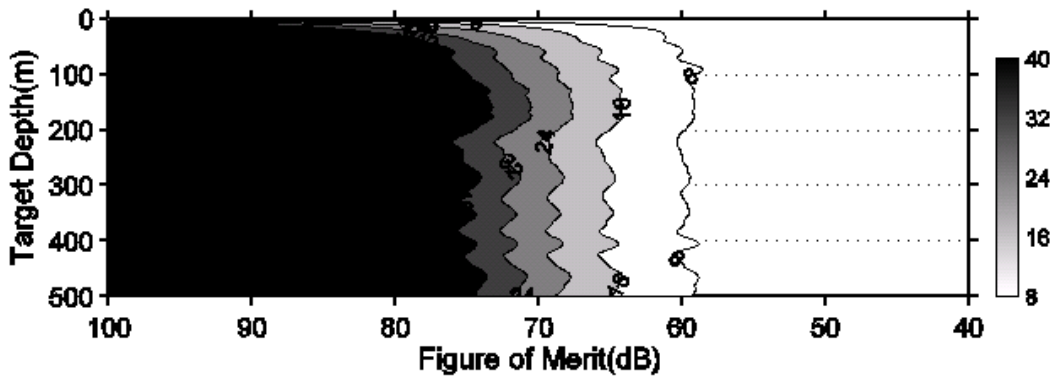


그림4.15 센서수심 90m일 때의 피탐지거리(50Hz)

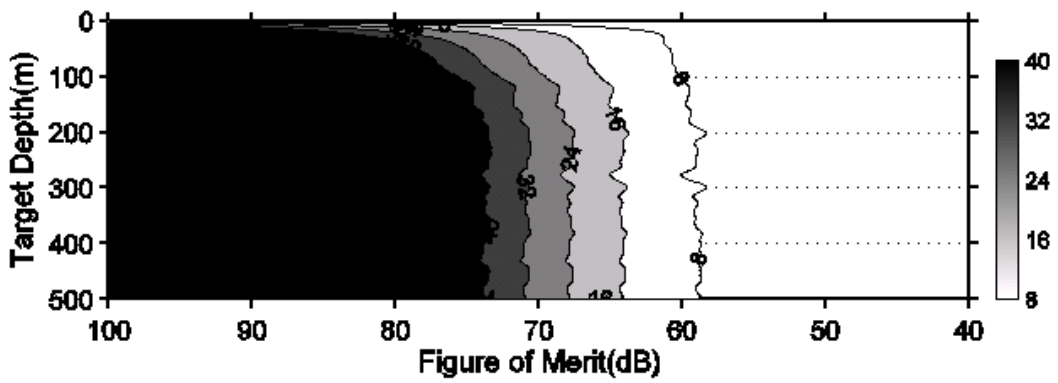


그림4.16 센서수심 200m일 때의 피탐지거리(50Hz)

4.1.2 Up slope 환경

Up slope 해양환경은 표적이 위치한 해역의 바닥에서 해수면까지의 전체 수심이 탐지센서가 위치한 지점의 전체 해역의 수심 깊이보다 깊은 환경으로 음원에서 탐지센서로 이동 할수록 수심이 얕아지는 환경이다. 이런 환경에서 표적에서 방사된 신호가 탐지해역을 통해 전달될 때의 피탐지확률을 계산을 통하여 탐지환경이 피탐지확률에 어떤 영향을 주는지 Down slope 환경에서의 피탐지확률과 비교하여 검증하였다.

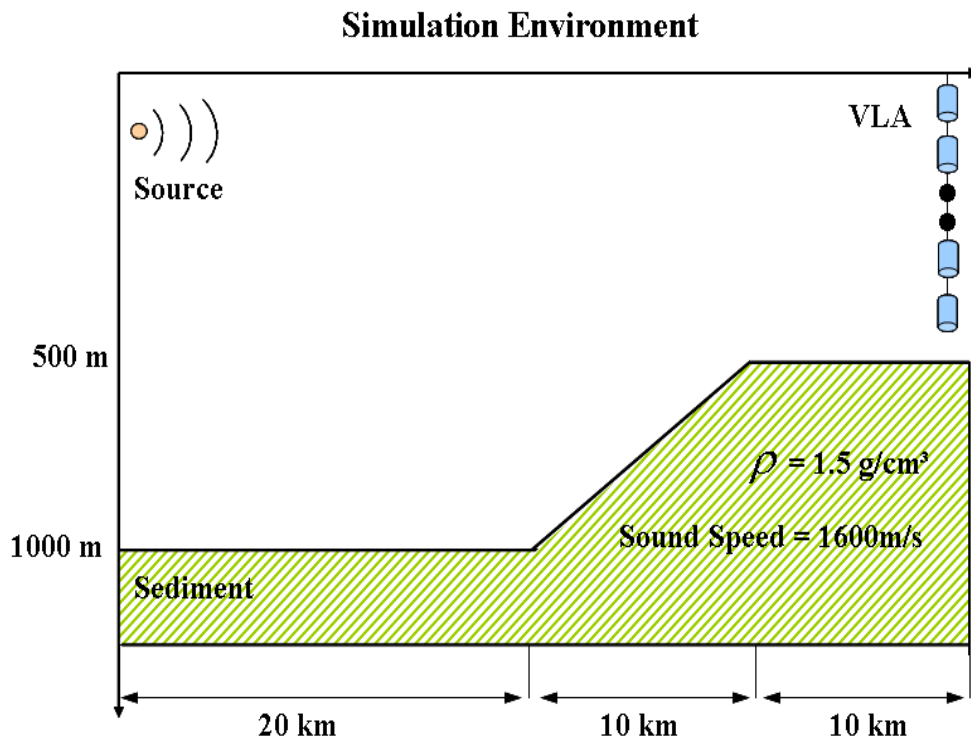


그림 4.17 Up slope 환경의 탐지해역 정보

Case1. 400Hz

(가) 전달손실

그림4.18, 4.19, 4.20에서의 Up slope 탐지환경에서의 전달손실을 나타내고 있다. 음원에서 발생된 신호는 수중에서 해수를 통해 해저면과 해수표면에서 반사와 굴절이 반복되며 일정한 간격으로 수렴지역을 보이며 전달되는 것을 확인 할 수 있다. 음원과 역방향을 이루는 경사 지역을 지난 30km부터의 신호는 Down slope 환경에 비해 미약한 것을 확인 할 수 있다.

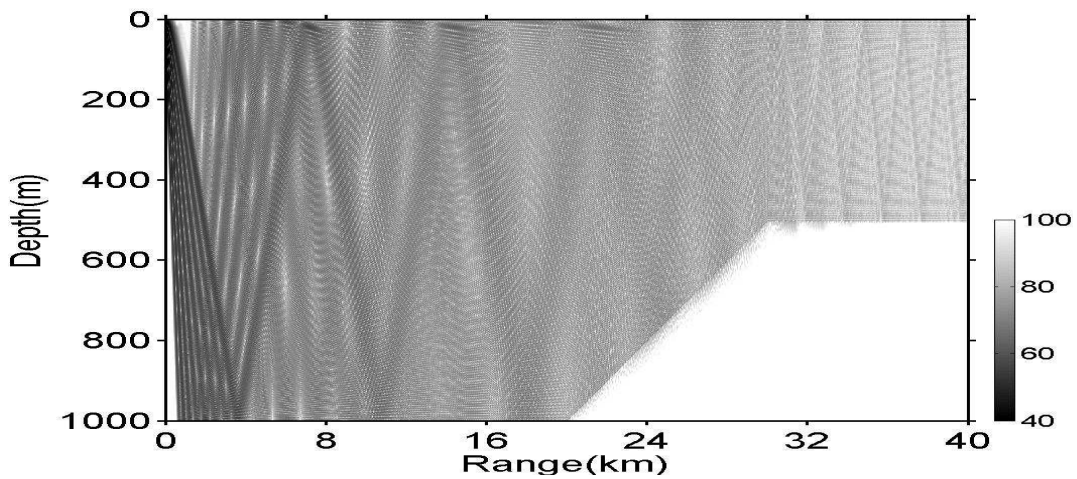


그림4.18 음원수심 20m일 때의 전달손실(400Hz)

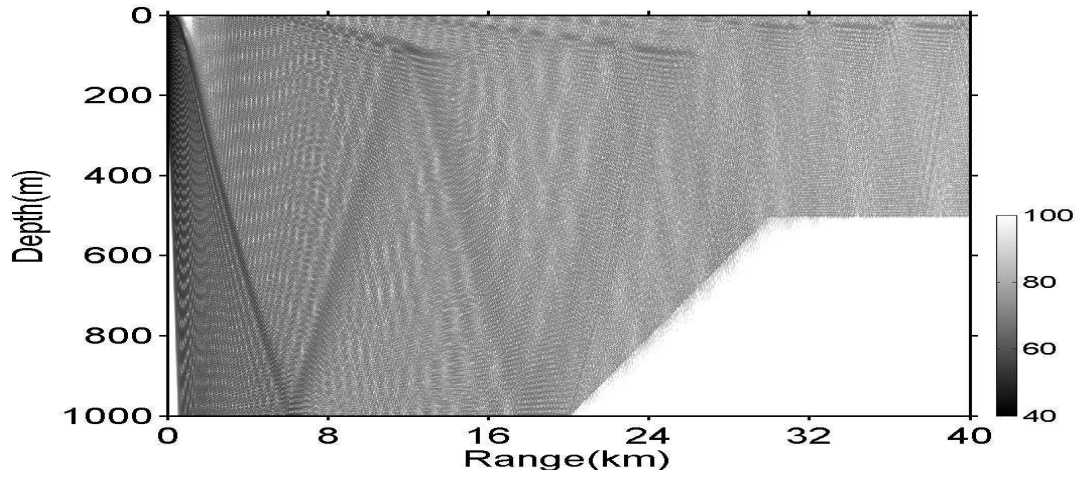


그림4.19 음원수심 90m일 때의 전달손실(400Hz)

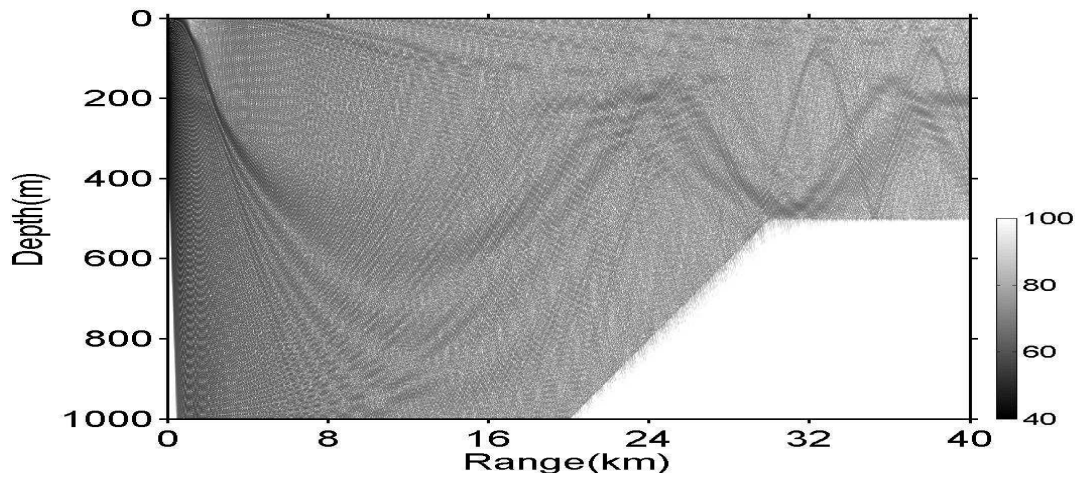


그림4.20 음원수심 200m일 때의 전달손실(400Hz)

(나) 피탐지거리

그림4.21, 4.22, 4.23에서는 Up slope 환경에서 탐지 센서의 수심이 20m, 90m, 200m로 고정되었을 때 피탐지거리를 계산 한 것이다. Down slope의 환경에서보다 다소 낮은 탐지거리를 보이고 있다. 가령 탐지센서의 깊이가 200m로 고정되고 표적의 깊이가 400m일 때 FOM이 70일 경우 탐지거리는 29km임을 그림4.23에서 확인 할 수 있으며, Down slope환경에서 같은 조건일 때 탐지거리가 32km비해 보다 낮은 탐지거리를 확인 할 수 있다. 원인은 신호가 표적에서 센서로 해저면과 해수면사이에서 진행되는 과정에서 해저면의 경사가 Up slope인 경우 경사면에 도달한 신호가 경사면과 수직인 방향으로 반사되어 되돌아가거나 산란되고 일부의 신호는 경사면에 흡수되는 등 전체적으로 경사면이 Down slope 환경보다 신호를 감소시키는 부분이 크게 작용한다. 따라서 센서에 측정된 신호에서 계산된 탐지거리는 Down slope에 비해 다소 감소되는 것을 확인 할 수 있다.

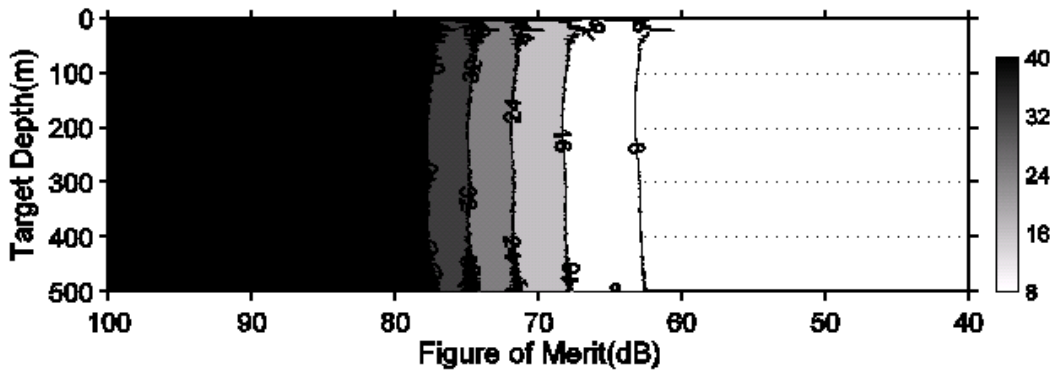


그림4.21 센서수심 20m일 때의 피탐지거리(400Hz)

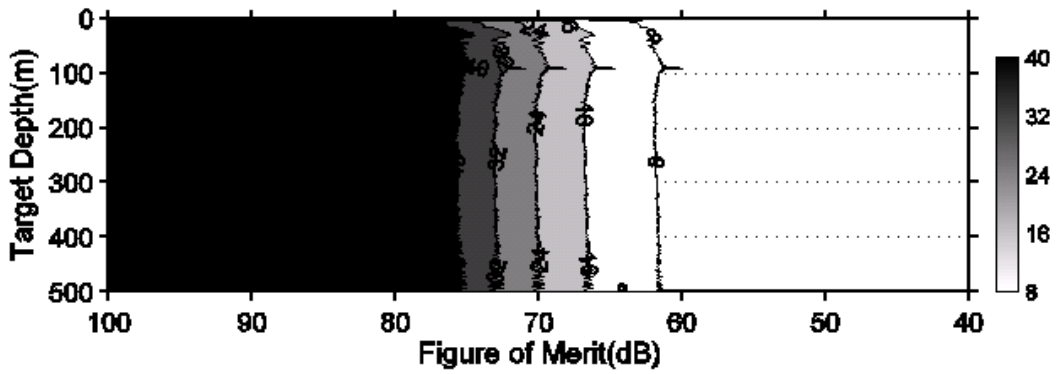


그림4.22 센서수심 90m일 때의 피탐지거리(400Hz)

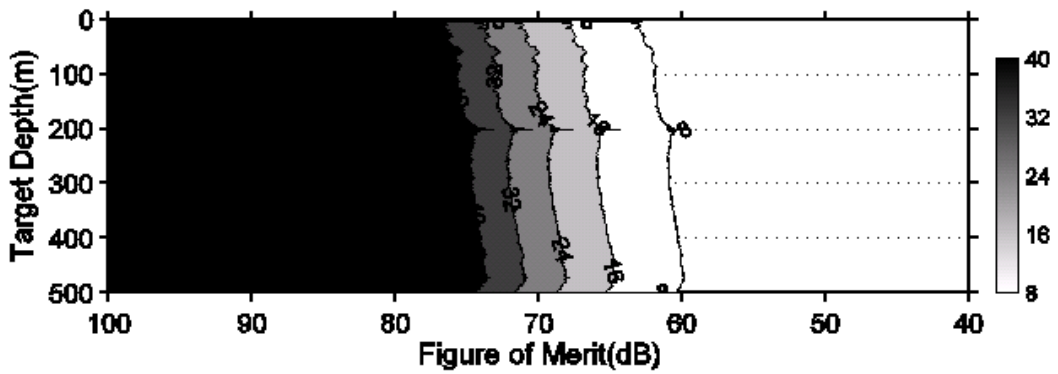


그림4.23 센서수심 200m일 때의 피탐지거리(400Hz)

Case2. 50Hz

(가) 전달손실

50Hz의 경우 같은 환경에서 주파수가 높은 400Hz에 비해 진행되는 신호의 경로가 보다 불명확하게 진행되는 것을 그림2.24, 2.25, 2.26에서 확인할 수 있다. 그리고 해저면에서 감쇠가 상대적으로 적어 보다 해저면 깊은 지점까지 신호가 바닥에 투과되는 신호를 확인 할 수 있다. 또한 음원이 위치한 수심이 얕을수록 음선의 각도, 음속에 의한 영향, 해수면과의 상호작용으로 인한 감쇠가 높아 센서에 도달된 신호가 미약한 것을 확인 할 수 있다. 특히 신호가 진행 될수록 경사면에서 발생하는 감쇠가 상대적으로 Down slope의 탐지환경에 비해 보다 높음을 확인할 수 있다.

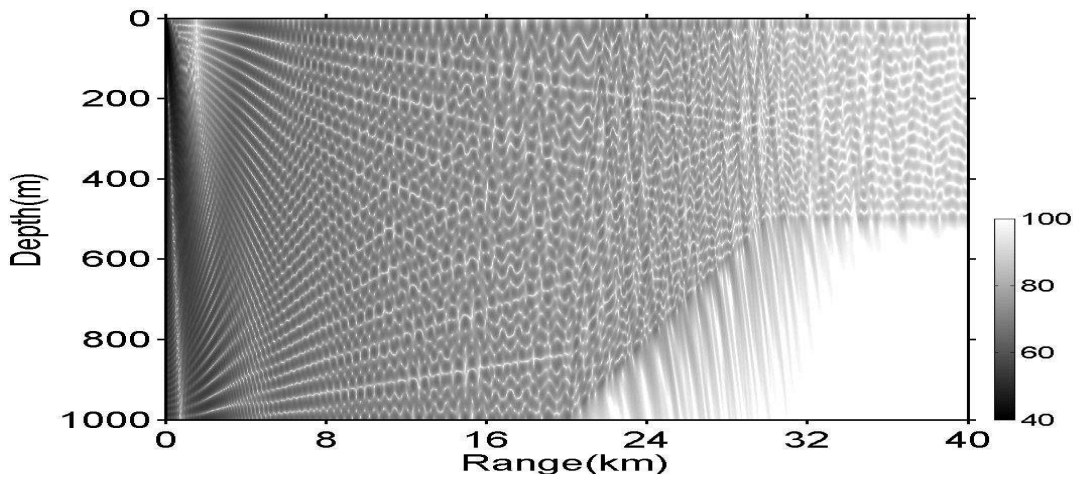


그림4.24 음원수심 20m일 때의 전달손실(50Hz)

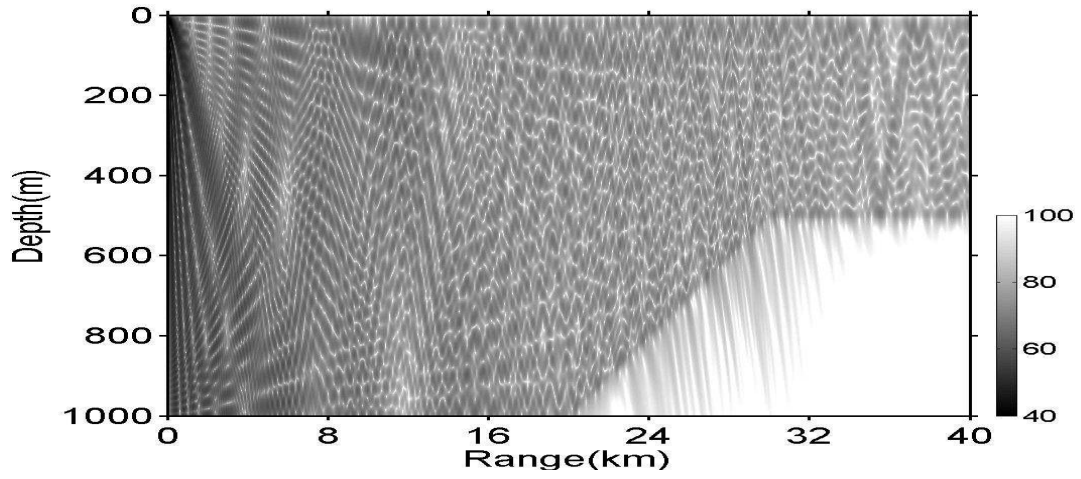


그림4.25 음원수심 90m일 때의 전달손실(50Hz)

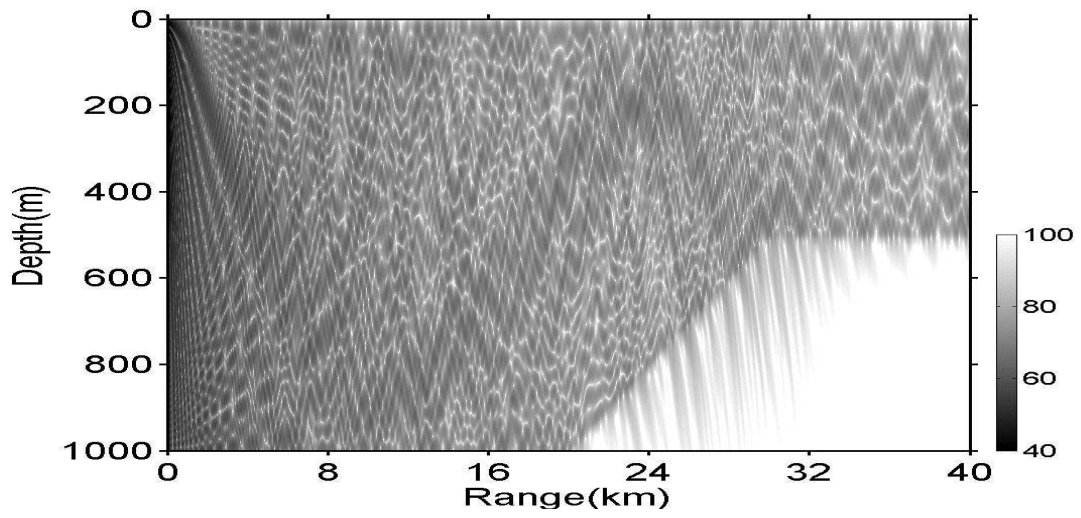


그림4.26 음원수심 200m일 때의 전달손실(50Hz)

(나) 피탐지거리

같은 탐지 환경에서 400Hz의 경우에 비해 보다 높은 탐지거리를 보이고 있으며, 탐지거리의 패턴에서는 해양의 정보와 크게 상관없이 탐지센서가 존재하는 깊이에서 탐지거리가 높은 것을 확인 할 수 있다. Down slope 환경에 비해 탐지센서가 존재하는 수심에 이외의 깊이에서 표적이 존재할 때 탐지거리 패턴은 보다 단순하였다.

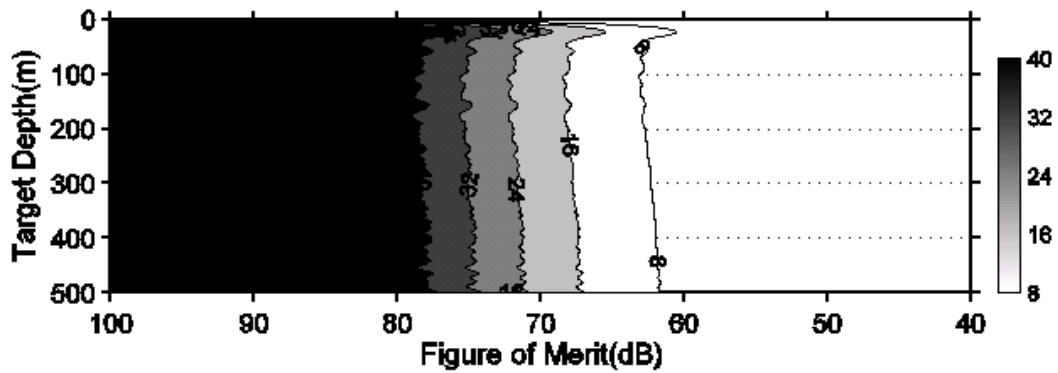


그림4.27 센서수심 20m일 때의 피탐지거리(50Hz)

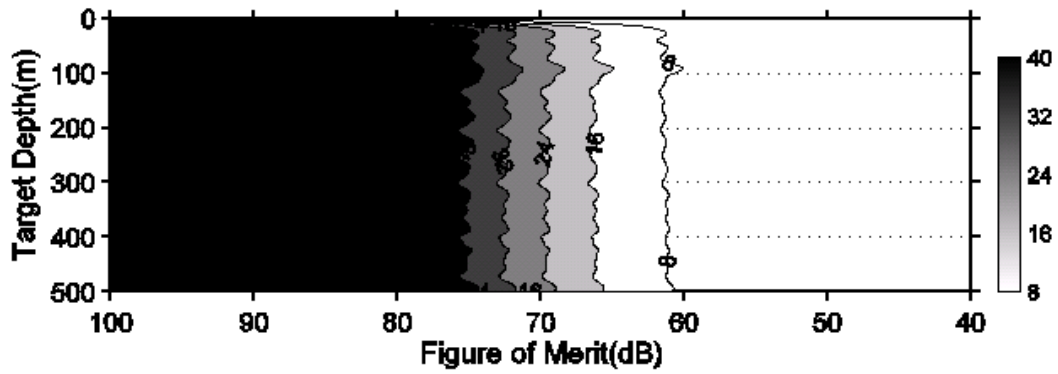


그림4.28 센서수심 90m일 때의 피탐지거리(50Hz)

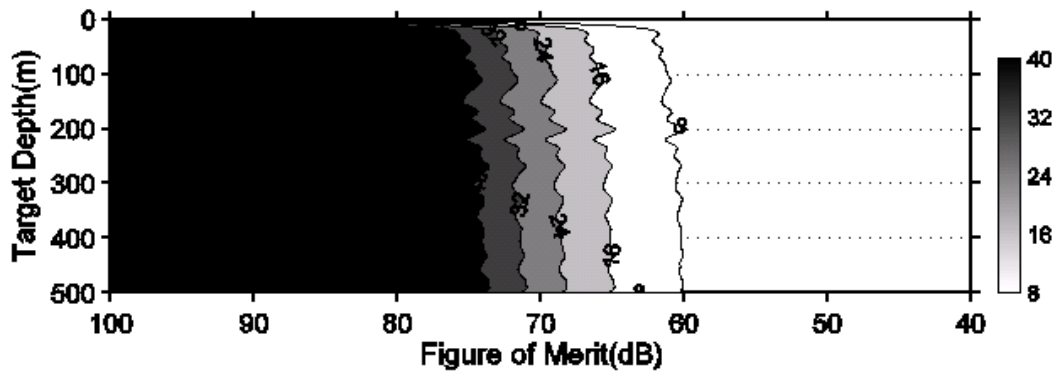


그림4.29 센서수심 200m일 때의 피탐지거리(50Hz)

	Frequency	Receiver depth	FOM이 60일 때 탐지거리	FOM이 70일 때 탐지거리
Down slope	400Hz	20m	6km	22km
		90m	7km	25km
		200m	9km	30km
	50Hz	20m	7km	24km
		90m	8km	28km
		200m	10km	30km
Up slope	400Hz	20m	4km	10km
		90m	5km	12km
		200m	7km	14km
	50Hz	20m	5km	22km
		90m	6km	25km
		200m	8km	30km

표 4.1 모의실험환경에서 해저지형의 경사 방향에 따른 탐지거리 비교

4.2 센서의 깊이를 모를 경우

수중에 있는 표적에서 탐지를 위해 움직이고 있는 함정의 위치 정보와 센서의 깊이를 미리 파악하고 피탐지거리를 최소화하기 위해 표적의 운용수심을 결정하는 것은 사실상 어려운 문제이다. 그것은 수중이라는 제한된 공간에 있는 표적이 탐지하는 측에 관한 정보의 확보가 어렵고, 탐지센서 역시 항상 일정하게 움직이고 있기 때문에 센서의 위치를 미리 파악하여 것은 매우 힘들기 때문이다. 이럴 경우 가역성원리를 적용하여 이미 알고 있는 탐지센서의 깊이에서 표적과 탐지센서의 위치를 바꿈으로서 새로운 탐지센서의 깊이를 파악할 수 있다. 이것은 탐지센서의 깊이를 함수로 하여 특정 수심에 탐지센서가 고정되어 있을 때 가용수심에서 표적의 깊이별 피탐지확률을 구하고, 그리고 표적의 깊이에 상응하는 탐지센서의 새로운 수심에서 표적의 깊이별 탐지확률을 구하여 전체가용 깊이에 대한 탐지거리를 계산한다. 이때 이미 계산된 피탐지확률에서 탐지센서가 특정한 수심(z_r)에 존재할 확률($p(z_r)$)을 곱하고 해역의 가용수심에 대해서 탐지센서의 수심 방향으로 적분하고 평균치를 취함으로써 새로운 피탐지확률 $P_D^{URD}(FOM, r, z_s)$ (URD: Unknown Receiver Depth) 을 식(4-1)과 같이 구할 수 있다.

$$P_D^{URD}(FOM, r, z_s) = \int_0^{\infty} p(z_r) p_D(FOM, r, z_s | z_r) d(z_r) \quad (4-1)$$

피탐지거리 $R^{URD}(FOM, z_s)$ 는 계산된 피탐지확률을 앞에서 이미 언급한 피탐지거리의 정의에 의해 거리방향의 적분을 통해서 아래의 식과 같이 계산한다.

$$DR^{URD}(FOM, z_s) = \int_0^{\infty} P_D^{URD}(FOM, r, z_s) dr \quad (4-2)$$

$$P(z_s) = \begin{cases} 1/500 & z_s \leq 500 \\ 0 & z_s > 500 \end{cases} \quad (4-3)$$

식(4-3)은 표적이 수심 0~500m사이에 존재할 경우 그 깊이에서 탐지되는 확률은 동일하다는 의미이다. 그림4.30, 4.31에서는 탐지센서의 깊이를 모를 경우 각 탐지센서의 수심별 표적의 운용수심에 대한 탐지거리를 계산한 것을 나타내고 있다. 두 그림에서는 공통적으로 표적이 해수면 근처의 음속이 높은 수심에서 피탐지확률이 떨어지는 것을 확인 할 수 있으며, 음속이 상대적으로 가장 낮은 수심 300m에서 피탐지거리가 가장 높음을 볼 수 있다. 또한 Down slope 환경에서 탐지해역의 수심 전반적으로 Up slope 환경보다 탐지 거리가 높음을 확인 할 수 있었다.

표적과 탐지센서의 깊이가 같은 경우 이외의 깊이에서 탐지거리가 보다 감소하는데 특히 표적이 위치해 있는 수심에 비해 탐지센서가 존재하는 깊이의 음속이 빠를 경우 탐지거리는 보다 감소하게 된다. 그것은 표적이 위치해 있는 수심에 비해 탐지센서가 존재하는 깊이의 음속이 빠를 경우 표적으로부터 방사되는 음선의 각이 제한되어, 특정 각에서 벗어난 음선은 센서에 도착하기 전에 다시 되돌아가게 되고 이로 인해 음선 분포가 존재하지 않아 피탐지거리가 보다 짧아지기 때문이다. 이러한 효과를 창 효과라고 한다. 따라서 탐지센서가 음속이 높은 수심에 존재할 때 창 효과로 인해 음원에서 전달되는 신호 중에서 일부가 탐지센서에 전달되지 않고 그로 인해 상대적으로 피탐지거리가 감소하게 되는 것이다.

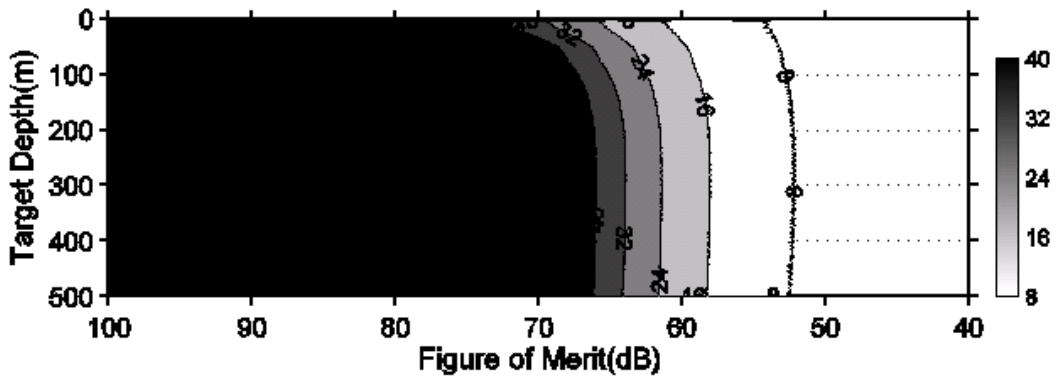


그림4.30 Down Slope 환경에서의 피탐지거리(400Hz)

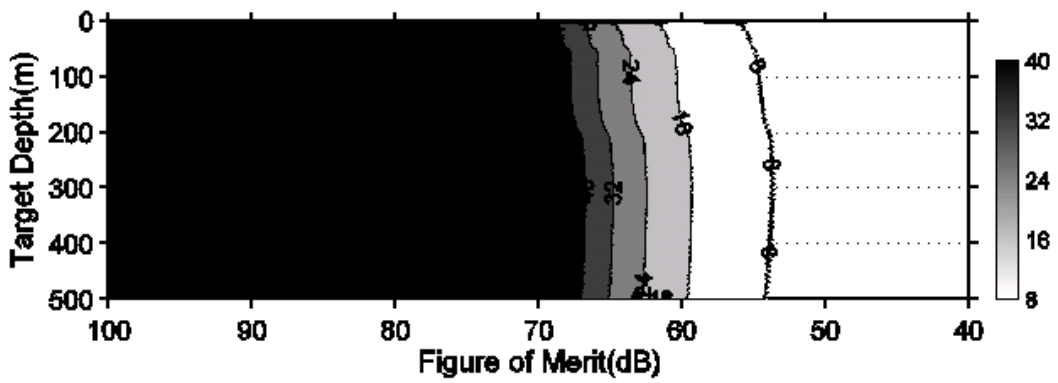


그림4.31 Up Slope 환경에서의 피탐지거리(400Hz)

5. 결 론

본 연구에서는 전형적인 여름의 음속 분포를 보이는 거리중속 환경에서 해저 지형과 음속이 피탐지거리에 영향을 미치는 것을 알아보기 위해 탐지센서의 깊이가 알려진 경우와 모를 경우 Down slop 해양환경, Up slope 해양환경에서 표적의 깊이에 따른 탐지거리를 비교해보았으며, 수치해석 결과를 이용하여 피탐지확률을 최소화하는 표적의 깊이를 다음과 같이 추정하였다.

- 탐지센서의 깊이를 파악하고 있을 경우 표적이 위치한 음속이 상대적으로 낮은 수심 200m에 비해 음속이 높은 수심인 20m에서 탐지확률이 보다 낮았으며, 탐지센서가 위치한 깊이에서 표적이 존재할 때 다른 깊이에 비해 상대적으로 피탐지거리가 증가하였다. 탐지센서가 위치한 깊이를 모를 경우 또한 음속이 높은 수심보다 상대적으로 음속이 낮은 수심 일수록 탐지 거리는 증가함을 확인 하였다. 특히 Sound channel axis인 수심 300m지점에서 표적이 위치 할 때 피탐지거리는 상대적으로 가장 높아지는 것을 확인 하였다. 이런 특징을 표적이 위치한 수심의 음속이 상대적으로 높고 탐지센서가 존재하는 수심과 탐지센서가 위치한 음속과 같은 음속을 보이는 깊이 피할 때 피탐지확률은 상대적으로 낮출 수 있었다.
- 해저면 경사의 방향에 따른 탐지거리는 음파가 해수와 해저면을 통해 진행 될 때 해저면 경사로 인해 신호의 감쇠가 크게 발생하는 Up slope 환경, 즉, 탐지를 당하는 피탐지자인 표적이 탐지자에 비해 깊은 수심에 위치할 때 탐지확률이 보다 낮음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Takaaki Musha, Hiroshi Uchida, and Mitsuhiro Nagashima " Self - Monitoring Sonar Transducer Array With Internal Accelerometers", IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL27, NO.1 JANUARY 2002
- [2] Carlo M. Ferla and Michael B. Porter "Receiver Depth Selection for Passive Sonar Systems", IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL.16, NO. 3, JULY 1991
- [3] Yaakov Bar-Shalom, Leon J. Campo, and Peter B. Luh "From Receiver Operating Characteristic to System Operating Characteristic: Evaluation of a Track Formation System", IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL35, NO.2, FEBRUARY 1990
- [4] M. D. Collins, R. J. Cederberg, D. B. King, and S. A. Chin-Bing, " Comparison of Algorithms for Solving Parabolic Wave Equation," J. Acous. Soc. Am.
- [5] William S. Burdic "Underwater Acoustic System Analysis", Prentice-Hall, INC. Engelwood Cliffs, NJ 07632
- [6] R.J. Uric, "Principles of Underwater Sound", New York: McGraw-Hill, 1983[5] A.D. Waite(2002) "Sonar for Practising Engineers", JOHN WILEY & SONS, LTD
- [7] Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon "Array Signal Processing: Concepts and Techniques", PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632
- [8] Richard O. Nielsen "Sonar Signal Processing", Artech House Boston London