

논문 2016-53-5-7

# 천해에서 해저면 반사파의 모델링을 통한 물체의 탐지

## ( Detection of an Object Bottoming at Seabed by the Reflected Signal Modeling )

온 백 산\*, 김 선 호\*, 문 우 식\*, 임 성 빈\*\*, 서 익 수\*\*\*

( Baeksan On, Sunho Kim, Woosik Moon, Sungbin Im<sup>®</sup>, and Iksu Seo )

### 요 약

해저면에 착저된 물체를 탐지하는 문제는 다양한 분야에서 중요한 문제이다. 본 논문에서는 천해에서 평탄한 해저면에 물체가 놓여있는 경우 이것의 위치를 탐지하는 방법을 제안한다. 기존 방법으로는 사이드스캔소나를 사용하여 탐지영역내에서 영상을 얻고 영상신호처리 기술을 이용하여 원통을 인식하는 연구들이 수행되어 왔으나 이는 높은 주파수를 사용하기 때문에 탐지거리가 짧고 깨끗한 영상을 얻기 위한 탐지시간이 길다. 본 논문에서는 6~20KHz의 중주파수의 linear frequency modulated (LFM) signal을 사용하는 monostatic active sonar system을 사용하여 수심 100m 내외의 천해에서 연속적인 ping에 따른 received reflected signals 간의 모델링을 수행하여 이 모델링 error의 변화에 따라 착저된 물체의 유무를 결정짓게 된다. 이 방법은 해저면이 균일한 sediment로 구성되었다는 가정만을 기반하며, 추가적으로 sediment를 구성하는 종류에 대한 사전 정보가 필요없다는 장점이 있다. 탐지확률과 탐지거리 측면에서 제안된 방법의 가능성을 모의실험을 통하여 검증하였다.

### Abstract

Detecting an object which is located at seabed is an important issue for various areas. This paper presents an approach to detection of an object that is placed at seabed in the shallow water. A conventional scheme is to employ a side-scan sonar to obtain images of a detection area and to use image processing schemes to recognize an object. Since this approach relies on high frequency signals to get clear images, its detection range becomes shorter and the processing time is getting longer. In this paper, we consider an active sonar system that is repeatedly sending a linear frequency modulated signal of 6~20 kHz in the shallow water of 100m depth. The proposed approach is to model consecutively received reflected signals and to measure their modeling error magnitudes which decide the existence of an object placed on seabed depending on relative magnitude with respect to threshold value. The feature of this approach is to only require an assumption that the seabed consists of an homogeneous sediment, and not to require a prior information on the specific properties of the sediment. We verify the proposed approach in terms of detection probability through computer simulation.

**Keywords** : Active sonar, bottoming objects, shallow water, reverberation, cancellation

\* 학생회원, 숭실대학교 정보통신공학과  
(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

\*\* 정회원, 숭실대학교 전자정보공학부  
(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

\*\*\* 정회원, 국방과학연구소 소나체계개발단  
(SONAR Systems PEO, Agency for Defense Development)

® Corresponding Author(E-mail : sbi@ssu.ac.kr)

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다.(계약번호 UD140004DD)

Received ; April 2, 2016

Revised ; April 15, 2016

Accepted ; May 2, 2016

## I. 서 론

해저면에 착저된 물체의 탐지는 군사 및 민수 측면에서 다양한 응용분야에서 관심을 받는 중요한 문제이다. 예를 들어, 해저면의 구성 성분으로 모래 또는 진흙 상황에 놓여있는 물체의 탐지는 수중환경 보호를 위한 수중탐사에 필수적인 단계이며 군사적 탐지 분야에서도 중요한 기술이다.

기존 접근 방법으로는 주로 사이드스캔소나를 적용

하여 탐지 영역 내에서의 영상을 얻고 여기서 영상신호 처리 기술을 이용하여 원통형 물체를 인식하는 연구들이 수행되어왔다<sup>[1~2]</sup>. 여기서 사용되는 소나영상은 해저의 표면이나 표적으로부터 산란되는 음파 강도를 이용하여 구성한다. 이러한 영상들은 해상도가 매우 낮고 잡음이 심하여 실시간으로 처리하여 물체를 탐지하는 것이 불가능하다. 또한 사용 주파수가 100 kHz 이상의 고주파를 사용하여 탐지 거리가 매우 짧고, 깨끗한 영상을 얻기 위해서는 매우 느린 속도로 예인하여야 하므로 탐지 영역이 상대적으로 넓지 못하다.

한편, 미국 University of Washington의 Applied Physics Lab. (APL)에서는 최근 천해의 해저면에 착저된 기뢰 탐지를 위해 중주파수를 이용하여 1~2미터 내외의 표적에서의 산란에 대한 연구를 수행하고 있다<sup>[3]</sup>. 이 연구에서는 1-30 kHz 주파수를 사용하여 다양한 원통형 물체에서의 산란에 대한 모의실험과 실제 실험데이터 간의 비교 연구를 수행하고 있으며, 표적에 대한 영상보다는 표적으로부터 반사되는 표적강도와 표적과 접한 해저면의 특성을 모델링하는 연구를 수행하고 있다.

본 논문에서는 해저면에 착저된 물체 특히 원통형 물체를 탐지하는 알고리즘을 제시하고자 한다. 앞에서 언급된 사이드스캔소나를 이용하는 경우 고주파수를 사용하므로 탐지거리가 일반적으로 500m 이내로 제한되며 정확한 탐지를 위해서는 3 knots의 매우 느린 속도로 예인하여야 하므로 신속한 탐지에 적용하는데 어려움이 있다. 본 논문에서는 6~20 kHz 중주파수를 사용하는 연속된 ping들을 이용하는 500m-1000m 거리에 착저된 원통형 물체의 탐지방식을 제안하고자 한다.

제안하는 탐지방식에서는 중주파수의 LFM (linear frequency modulated) 신호를 사용하는 단상태 능동 소나시스템을 고려한다. 100 m 수심을 갖는 천해에서 소나의 위치는 해수면으로부터 10m 내외에 위치하여 해저면과 표적에서 산란된 음파가 수신되는 환경을 가정한다. 일반적으로 균일한 특성을 갖는 해저면에서 산란되는 음파는 입사각에 따른 반사계수의 변화에만 종속되며 따라서 수신된 음파는 유사한 특성을 보인다. 그러나 표적이 있는 상황에서는 표적의 구조, 표적과 해저면이 접한 구조 및 표적의 재질에 의해 반사계수의 값은 해저면과 다른 특성을 보이며 또한 표적과 해저면이 이루는 각각의 구조적 특성에 따른 산란파에는 다른 특성의 잔향이 존재한다. 이러한 특성을 이용하여 먼저 해저면에서 연속적으로 산란된 음파간의 관계를 모델링하는 필터를 구성하여, 이를 새로 수신된 반사파와 모

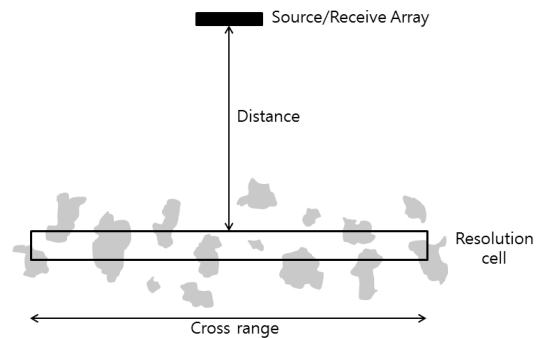


그림 1. 일반적인 형태의 소나 레졸루션 셀과 패치  
Fig. 1. General form of a resolution cell and patches of sonar.

델링 필터를 이용하여 예측한 반사파와의 차이인 오차 신호를 찾아 이 신호의 에너지 크기를 미리 설정한 신호의 문턱값과 비교하여 탐지여부를 결정짓는다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장의 본문에서는 표적의 반향음 모델과 신호 및 음향환경 모델에 대해서 설명하고 목표를 효율적으로 탐지하기 위한 예측 필터를 제안한다. 3장에서는 모의실험 및 실험을 통해 해저면의 목표물을 탐지하기 위해 제안한 예측 필터의 성능을 평가하고 4장에서 결론을 맺는다.

## II. 본 론

### 1. 해저면과 표적의 반향음 모델

#### 가. 해저면에 대한 산란 모델

산란이 일어나는 패치 (patch)들은 해저면에 골고루 분포되어 있으며, 이러한 패치들 중 셀 범위 안의 패치들의 산란에 대한 모델링이 필요하다. 일반적인 형태의 소나의 resolution cell과 패치들의 모형은 그림 1과 같이 표현 할 수 있다.

레이리 분포(Rayleigh distribution)는 레졸루션 셀 안에 충분히 많은 산란체들이 분포되어 있다는 가정 하에 충분히 많은 랜덤 분포들의 합은 가우시안 분포로 수렴한다는 중심극한정리(central limit theorem)를 통해 적용되어진다. 하지만 최근의 기술의 발전을 통해 고해상도의 능동 소나 시스템이 가능해졌고 주어진 레졸루션 셀 안에서 영향을 끼치는 잔향 성분들의 수를 낮출 수 있게 되었다. 따라서 그림 1과 같이 레졸루션 셀 내부에 무수히 많지 않은 산란체들이 분포되어 있다면 중심극한정리가 적용되지 않으며, non-Rayleigh 분포가 적용되어진다. 또한 본 논문에서의 시뮬레이션은 수심

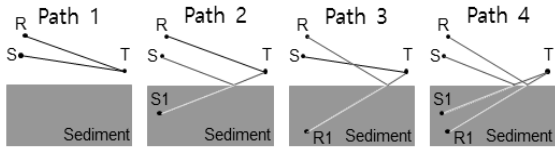


그림 2. 음원과 수신기 사이의 간략화 된 4-경로 모델  
Fig. 2. Simplified four path model between source and receiver.

100m의 천해환경을 가정하고 수행하므로 해저면에서의 swarth의 크기가 크지 않아, 유한개의 산란체를 고려하여 non-Rayleigh 분포를 적용하였다. D. A. Abraham 과 A. P. Lyons 는 이러한 가정 하에 Rayleigh 분포가 아닌 k-분포를 적용하여 잔향 신호를 유도하였다<sup>[4]</sup>. 유한개의 산란체로부터의 수신신호가 정합필터링된 신호의 포락선은 k-분포를 이루며, k-분포의 shape 파라미터는 산란체의 수와 관련되고, scale 파라미터는 산란체들의 평균 사이즈에 의해 결정되어진다. k-분포 모델은 패치의 사이즈들이 지수 분포를 이룬다는 가정 하에 유도되므로, 패치의 사이즈가 레졸루션 셀보다 크거나 지수분포를 이루지 않는다면 k-분포를 적용하는 것이 정확하지 않을 수도 있다. 하지만, k- 분포는 shape 파라미터와, scale 파라미터에 따라 다양한 환경과 상황에 적용되기 용이하기 때문에 근사화하기에 아주 좋은 방식이 될 수 있다. 따라서, k-분포의 두 파라미터는 곧해져 환경의 물리적 모델이 될 수 있으므로 시뮬레이션 환경에 따라 shape 파라미터와 scale 파라미터를 설정하여 k-분포를 갖는 정합필터링 된 산란신호를 생성 한 후 본 실험의 송신신호를 적용하여 수신된 잔향신호를 모델링하였다.

#### 나. 타겟에 대한 경로 및 산란 모델

음원으로부터 수신기로 되돌아오는 경로에 대한 연구는 다양하게 이루어져 왔다. 그 중에서 소리의 전달 속도가 일정하고 음원과 표적이 충분한 거리를 유지하고 있다고 가정하면, 해저면과 표적 그리고 음원과 수신기 사이의 경로는 그림 2와 같이 도시할 수 있다<sup>[5]</sup>.

경로 1의 신호는 타겟에 맞고 직접 돌아오는 신호이고, 경로 2와 3은 음원-타겟-해저면-수신기, 음원-해저면-타겟-수신기의 경로를 통해 돌아오는 신호, 경로4는 음원-해저면-타겟-해저면-수신기의 경로를 통해 돌아오는 신호이다. 반향음은 수신기에 경로 1 다음에 경로 2와 3 그리고 경로 4 순으로 도착하게 된다. 이에 따른 산란강도는 식 (1)과 같다.

$$TS(f, \phi, \theta_g) = 20 \log(r_r/r_o P_o) (p_{path1} + 2R_b(\theta_g) \exp(i2ka \sin \theta_g) p_{path2} + R_b^2(\theta_g) \exp(i4ka \sin \theta_g) p_{path4}) \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 주파수,  $\phi$ 는 방위각,  $\theta_g$ 는 지표각,  $r_r$ 는 거리,  $r_o$ 는 기준거리,  $R_{ws}(\theta_g)$ 는 해저면 반사계수,  $a$ 는 원통 반지름이다. 2번째 항은 경로 2와 3은 결과적으로 같기 때문에 2배를 했다. 그리고 해저면 반사계수는 다음 식과 같다.

$$R_{ws}(\theta_g) = \frac{\rho \sin \theta_g - (\kappa^2 - \cos^2 \theta_g)^{1/2}}{\rho \sin \theta_g + (\kappa^2 - \cos^2 \theta_g)^{1/2}} \quad (2)$$

여기서  $\rho = \rho_b/\rho_w$ ,  $\kappa = k_2/k_1 = (1 + i\delta)/v$ ,  $v = c_2/c_1$ 이다.

본 논문에서 고려하는 원통형 물체의 산란에 관한 모델은 Ye<sup>[6]</sup>가 제안한 모델을 사용하였다. 이 논문에서는 밀폐된 유한한 길이의 원통의 반향을 유도하였으며, 원통 부분의 산란과 원통의 끝 부분에서의 산란 효과가 합쳐져 유한한 길이의 원통의 산란으로 표현된다. 이는 다음 수식과 같이 나타난다.

$$f_{body}(\theta_s, \phi_s, \theta_i) = \frac{-iL}{\pi} \text{sinc} \Delta \sum_{n=0}^{\infty} B_n F_n (-1)^n \cos(n\phi_s) \quad (3)$$

$$f_{end}(\theta_s, \phi_s, \theta_i) = \frac{-ika^2}{2} \left( \frac{gh-1}{gh+1} \right) (\cos \theta_s - \cos \theta_i) e^{-ikL/2(\cos \theta_s - \cos \theta_i)} \frac{J_1(k'a)}{k'a} \quad (4)$$

$$TS = 20 \log_{10} |f_{body} + f_{end}| \quad (5)$$

여기서  $\theta_s$ 와  $\phi_s$ 는 음원이 들어오는 입사각과 고도각,  $\theta_i$ 는 반사각,  $B_n$ 은 경계 조건에 의해 결정되고,  $H_n$ 은 Hankel 함수와 Bessel 함수로 유도되는 값이다. 그리고  $g$ 는  $\rho_1/\rho$ ,  $h$ 는  $k/k_1$ 이다.

#### 다. 해저면 산란의 다중 경로 모델

앞의 가 항에서 해저면에 대한 산란 파형을 모델링하였다. 이렇게 생성된 신호에 다중경로와 반사계수를 고

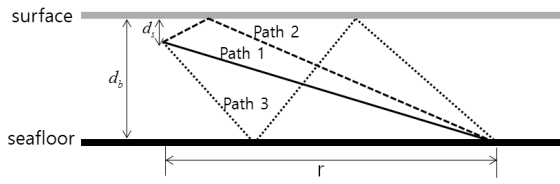


그림 3. 다중 경로의 진행방향

Fig. 3. Transmission direction of each multipath.

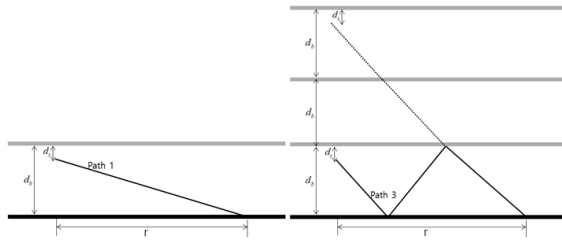


그림 4. 경로 1과 3의 이동 거리

Fig. 4. Traveling distances of paths 1 and 3.

려하여 잔향 신호를 생성한다. 다중경로 모델 방식은 Abraham과 Lyons가 제시한 방식에서 착안하였다<sup>[7]</sup>. 고려하는 다중 경로는 그림 3과 같다.

그림 3과 같은 방식으로 여러 경로를 통해 신호가 이동하고 path의 번호가 홀수인지 짝수인지에 따라서 이동 거리와 시간지연을 다르게 계산한다.

그림 3의 경로 1과 3과 같은 홀수번째 경로는 그림 4처럼 표현할 수 있고, 각 경로의 길이  $l_{odd}$ 와 이동시간  $\tau_{odd}$ 를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$l_{odd} = \sqrt{(p_{odd}d_b - d_s)^2 + r^2} \quad (6)$$

$$\tau_{odd} = 2l_{odd}/c \quad (7)$$

$d_b$ 와  $d_s$ 는 해수면으로부터 해저면과 송,수신기까지의 거리이며,  $p_{odd}$ 는 홀수번째 경로의 번호이고,  $r$ 은 산란체로부터의 바닥 거리,  $c$ 는 수중에서 음파의 속도이다. 각 경로마다 바닥으로의 입사각은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_{odd} &= \tan^{-1}((p_{odd}d_b - d_0)/r) \\ &= \cos^{-1}(r/l_{odd}) \\ &= \sin^{-1}((p_{odd}d_b - d_0)/l_{odd}) \end{aligned} \quad (8)$$

입사각을 통해 각 path별 해저면, 해수면 반사손실과 산란강도를 고려하여야 한다. 홀수번째 path들은 해저면과 해수면에 각각  $(p_{odd} - 1)$ 번씩 반사되므로 이를

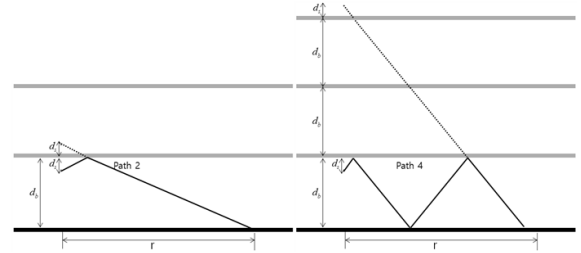


그림 5. 경로 2와 4의 이동 거리

Fig. 5. Traveling distances of paths 2 and 4.

적용하면 수신신호의 송신신호에 대한 진폭의 비는 다음과 같다.

$$a_{odd} = R_b(\theta_{odd})^{p_{odd}-1} R_s(\theta_{odd})^{p_{odd}-1} S_b(\theta_{odd}) \quad (9)$$

$R_b$ 와  $R_s$ 는 입사각에 따른 해저면, 해수면에 대한 반사계수이며,  $S_b$ 는 입사각에 따른 해저면의 후방산란강도이다.

짝수번째 이동경로들에 대해서도 같은 방식으로 파라미터를 계산할 수 있다.

그림 3의 path 2와 같은 짝수번째 경로는 그림 5처럼 표현할 수 있고, 각 경로의 길이  $l_{even}$ 와 이동시간  $\tau_{even}$ , 입사각  $\theta_{even}$ 을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$l_{even} = \sqrt{((p_{even} - 1)d_b + d_s)^2 + r^2} \quad (10)$$

$$\tau_{even} = 2l_{even}/c \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \theta_{even} &= \tan^{-1}((p_{even}d_b - d_0)/r) \\ &= \cos^{-1}(r/l_{even}) \\ &= \sin^{-1}((p_{even}d_b - d_0)/l_{even}) \end{aligned} \quad (12)$$

$p_{even}$ 은 짝수번째 경로의 번호이다. 짝수번째 path들은 해수면에  $p_{even}$ 번, 해저면에  $(p_{even} - 2)$ 번씩 반사되므로 이를 적용하면 수신신호의 송신신호에 대한 진폭의 비는 다음과 같다.

$$a_{even} = R_b(\theta_{even})^{p_{even}-2} R_s(\theta_{even})^{p_{even}} S_b(\theta_{even}) \quad (13)$$

해저면 반사계수  $R_b$ 는 타겟모델에서의 반사계수와 같고 해수면 반사계수  $R_s$ 는 다음과 같다.

$$R_s(\theta_g) = -\exp(-2k^2\sigma_s^2\sin^2\theta_g) \quad (14)$$

$k$ 는  $m$ 당 파수(wave number)이고  $k = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c_w$ 로 계산되며,  $\sigma_s$ 는 해수면의 거칠기의 근 값이다. 후방산란강도  $S_b$ 는 바닥의 재질, 입사각 등에 따라 달라지며, 후방산란강도에 대한 내용은 뒤의 모의실험 부분에서 설명한다.

각 음원의 이동경로에 따라 이동거리가 달라지므로 위에서 다룬 해저면의 반사손실, 후방산란강도 이외에 추가적으로 경로별 이동거리에 따른 신호의 감쇠비를 고려하여야 한다. 수중에서의 신호의 감쇠 (attenuation)는 흡수 손실 (absorption loss)과 확산 손실 (spreading loss)이 고려될 수 있다. 그 감쇠  $A(l, f)$ 의 식은 다음과 같다<sup>[8]</sup>.

$$10\log(A(l, f)/A_0) = k10\log l + l10\log a(f) \quad (15)$$

위의 식 (15)의 우변은 확산 손실과 흡수 손실의 합으로 구성된다.  $l$ 은 거리,  $f$ 는 kHz 단위의 주파수이다.  $k$ 는 기하학적 확산인자(geometry of propagation)를 의미하며  $k=1$ 인 경우 신호의 확산은 원통모양이며,  $k=2$ 인 경우 구 형태의 확산이 이루어진다. 모의실험에서는 일반적으로 사용되는  $k=1.5$ 의 값을 사용하였다. 흡수손실 상수는 Thorp's formula에 의해 다음과 같이 표현 될 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$10\log a(f) = 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2.75 \cdot 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (16)$$

위의 식은 1km 당 흡수손실을 의미하며, 수백 Hz 이상의 주파수에서 유효하다.

만약 주파수가  $f$  kHz 이고 파워가  $P$ 인 어떤 신호를 송신한다면, 수신되는 신호의 파워는  $P/A(l, f)$ 가 될 것이다. 또한  $p = 0, \dots, P-1$ 의 경로를 통해 전파되는 채널이라면 채널의 전달함수는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$H(l, f) = \sum_{p=0}^{P-1} a_p / \sqrt{A(l_p, f)} e^{-j2\pi f \tau_p} \quad (17)$$

$l_p$ 와  $\tau_p$ 는 각 경로별 이동거리와 시간지연이고,  $a_p$ 는

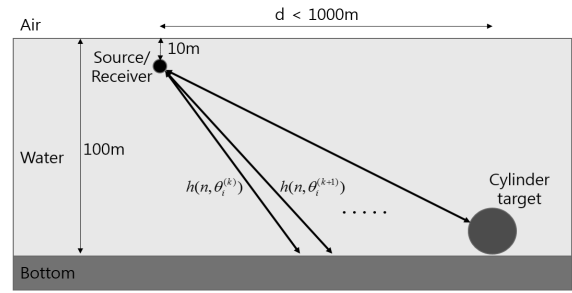


그림 6. 본 연구에서 가정하는 수중 환경  
Fig. 6. Underwater environment considered in the simulation.

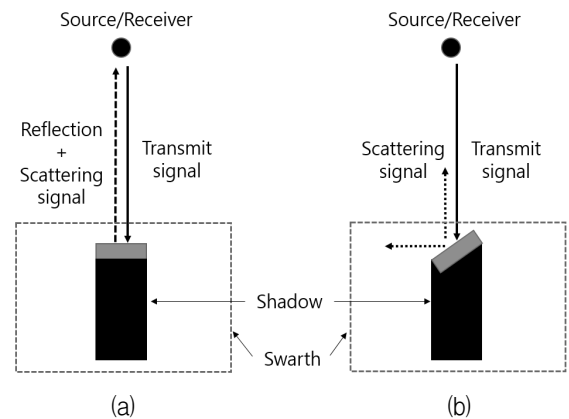


그림 7. 소나신호에 대해 원통이 수직하게 놓여있는 경우 (a)와 비스듬히 놓여있는 경우 (b)  
Fig. 7. A cylinder is placed vertical (a) and slant (b) to the sonar signal.

각 경로에서 일어나는 반사손실 등과 같은 추가적인 손실을 의미한다. 위와 같은 채널의 전달함수를 FIR필터로 구현하여 각 path별 진폭과 시간지연을 적용해 수신 신호를 모델링한다.

## 2. 음향환경 모델

능동 소나시스템에서 송수신 신호간의 관계를 다음과 같이 선형음향 채널로 모델링할 수 있다.

$$r(n, \theta_i) = h(n, \theta_i) * x(n) + v(n) \quad (18)$$

위 식에서  $x(n)$ 은 능동소나의 전송신호로 본 연구에서는 LFM 신호이다. 반면에  $r(n, \theta_i)$ 은 수신 신호이다. 이 때  $\theta_i$ 은 전송 신호  $x(n)$ 이 해저면에 입사되는 입사각을 나타낸다. 이 송수신 신호간에 형성되는 음향 채널을  $h(n, \theta_i)$ 으로 표시한다. 이 음향 채널은 해저면에 의한 산란 및 표적이 있는 경우에는 표적에 의한 반향을 포함하여 나타낸다. 기호 \*는 콘볼루션을 나타낸다. 수신시에 추가되는 배경잡음을  $v(n)$ 으로 표시하고 가

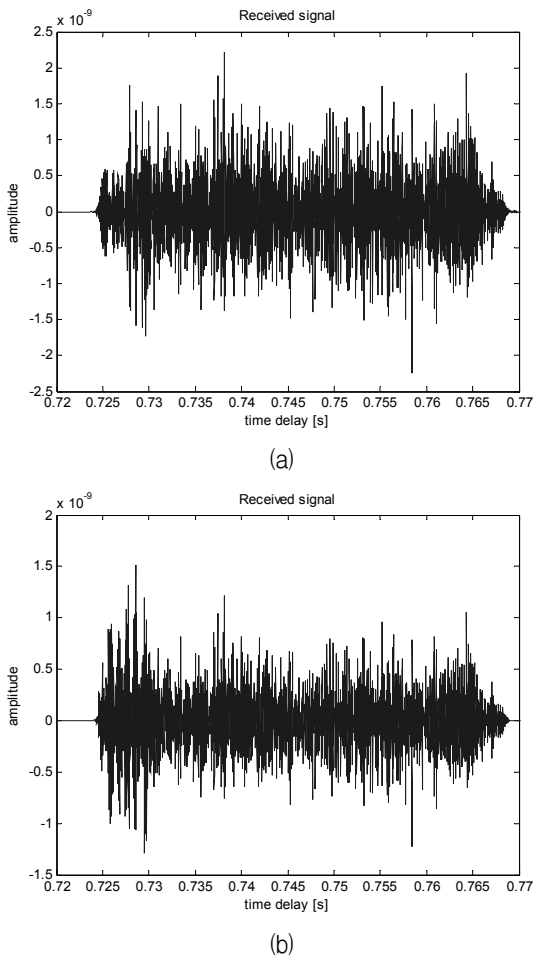


그림 8. 550m 바닥거리에 표적이 없을 때 (a)와 원통 축으로의 입사각이 80도인 표적이 있을 때 (b)의 수신신호 파형

Fig. 8. The received signal waveforms when no target exists (a), and when a target is placed and the incident angle of sonar signal to a cylinder is 80 degrees (b).

우시안 잡음으로 가정한다. 여기서 사용되는 전송신호  $x(n)$ 은 LFM 신호로 중심주파수 13 kHz, 대역폭 14 kHz를 갖는다.

본 논문에서 고려하는 수중 환경은 그림 6에 나와 있는 것처럼 균일한 특성을 갖는 해저면에 원통형 물체가 놓여 있다고 가정한다.

이 경우 원통형 물체가 그림 7(a)와 같이 송신신호에 수직하게 놓여있다면 타겟 신호의 크기는 탐지하기 쉬울 정도로 클 것이지만, 그림 7(b)와 같이 수직하게 놓여있지 않다면 타겟으로부터 돌아오는 반사신호의 크기는 현저히 줄어들게 된다<sup>[6]</sup>.

이러한 경우 그림 8과 같이 타겟 신호가 해저면에 의한 산란신호 사이에 묻히게 되어 일반적인 정합필터링과 문턱 값을 이용한 방법으로는 탐지가 어려워진다.

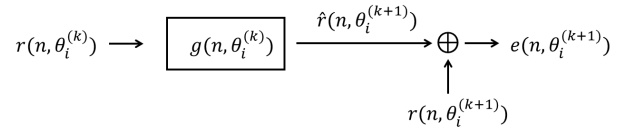


그림 9. 예측필터의 입출력과 오차신호의 생성

Fig. 9. Input and output of a prediction filter and generation of the residual signal.

본 논문에서는 원통형 타겟의 축에 대한 소나신호의 입사각이 80도인 상태에서 예측필터를 통해 탐지를 수행하였다.

천해에서 음원으로부터 일정한 시간간격으로 해저면에 인접한 지역으로 LFM 신호가 입사된다고 가정한다. 이때 형성되는 음향채널을 각각  $h(n, \theta_i^{(k)})$ ,  $h(n, \theta_i^{(k+1)})$  이라고 하면 이 두 채널은 유사한 특성을 갖는다. 따라서 수신신호  $r(n, \theta_i^{(k)})$ 과  $r(n, \theta_i^{(k+1)})$ 간에 유사한 특성을 갖는다. 그러나  $k+2$ 일 때 해저면에 표적이 있는 경우 반향음에 대한 채널  $h(n, \theta_i^{(k+2)})$ 은 기존의 채널  $h(n, \theta_i^{(k+1)})$ 과 달라지게 된다. 이러한 특성을 고려하여 다음과 같은 조건을 만족시키는 예측 필터 (prediction filter)를 수신신호 간에 설계한다.

$$\min \|g(n, \theta_i^{(k)}) * r(n, \theta_i^{(k-1)}) - r(n, \theta_i^{(k)})\|_2 \quad (19)$$

이 예측 필터를 사용하여 다음의 식을 이용하여 예측 오차신호  $e(n, \theta_i^{(k+1)})$ 를 계산한다.

$$e(n, \theta_i^{(k+1)}) = r(n, \theta_i^{(k+1)}) - g(n, \theta_i^{(k)}) * r(n, \theta_i^{(k)}) \quad (20)$$

여기서 주목할 점은 예측 필터  $g(n, \theta_i^{(k)})$ 을 설계할 때는  $k-1$ 번째 수신신호와  $k$ 번째 수신신호간에  $l_2$ -norm 관점에서 오차가 최소가 되도록 설계한다. 여기서 설계된 예측 필터  $g(n, \theta_i^{(k)})$ 를 이용하여  $k+1$ 번째 수신신호를 예측하고 실제 수신된 신호  $r(n, \theta_i^{(k+1)})$ 과 오차를 계산한다. 그림 9에 수신신호들을 이용하여 오차신호를 계산하는 과정을 도시하였다.

따라서 반향음의 특성이 변하지 않는 경우 오차신호  $e(n, \theta_i^{(k+1)})$ 의 에너지는 기존과 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 표적이거나 해저면의 특성이 바뀌는 경우 이 오차신호의 에너지는 급격히 커진다. 따라서 이에 대한 다음과 같은 가설을 세울 수 있다.

표 1. 제안된 알고리즘의 흐름도  
Table1. Flowchart of the proposed algorithm.

| 단계 | 실행   |
|----|--|
| 1  | $r(n, \theta_i^{(k-1)})$ 을 입력, $r(n, \theta_i^{(k)})$ 을 출력으로 Wiener Modeling 으로 $g(n, \theta_i^{(k)})$ |
| 2  | $\hat{r}(n, \theta_i^{(k+1)}) = g(n, \theta_i^{(k)}) * r(n, \theta_i^{(k)})$ 를 추정                      |
| 3  | $e(n, \theta_i^{(k+1)}) =  r(n, \theta_i^{(k+1)})  -  \hat{r}(n, \theta_i^{(k+1)}) $ 오차 계산             |
| 4  | 오차 신호의 에너지 $E(k+1)$ 계산   |
| 5  | $E(k+1) < T(k+1)$ 이면, $T(k+2)$ 계산 & 단계 1로 가기   |
|    | $E(k+1) > T(k+1)$ 이면, 물체 검출  |

$$H_1 : r(n, \theta_i^{(k+1)}) = h_{target}(n, \theta_i^{(k+1)}) * x(n) + v(n) \quad (21)$$

$$H_0 : r(n, \theta_i^{(k+1)}) = h(n, \theta_i^{(k+1)}) * x(n) + v(n) \quad (22)$$

위 가설에서  $h_{target}(n, \theta_i^{(k+1)})$ 은 표적 산란에 의하여 형성되는 수중 채널을 나타낸다. 따라서 결정 규칙은 다음과 같다.

$$\text{Select } H_1 : 10\log_{10}(E(k+1)) > T(k+1) \quad (23)$$

$$\text{Select } H_0 : \text{otherwise} \quad (24)$$

위 결정규칙에서  $E(k+1)$ 는 수신신호의 에너지에 대하여 오차신호의 정규화된 에너지를 나타내며, 계산은 다음과 같다.

$$E(k+1) = \sum_n |e(n, \theta_i^{(k+1)})|^2 / \sum_n |r(n, \theta_i^{(k+1)})|^2 \quad (25)$$

식 (23)의  $T(k+1)$ 는 문턱값으로 moving average filter를 사용하여 다음과 같이 설정한다.

$$T(k+1) = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k 10\log_{10}E(i) + \beta \quad (26)$$

즉, dB 스케일 평균값에 일정한 상수  $\beta$ 를 추가하여 문턱값을 정하였다. 참고로 다음 절의 모의실험에서는

표 2. 서해 경기만 남부의 연안해역 해저면에서 측정된 퇴적물 분포의 비율<sup>[10]</sup>

Table2. Percentage of sediment distribution measured in the coastal seafloor at the south part of Gyeonggi gulf of the Yellow Sea<sup>[10]</sup>.

| 종류    | Clay | Sand | Silt | Gravel |
|-------|------|------|------|--------|
| 비율(%) | 0    | 85.0 | 0.3  | 14.7   |

$10\log_{10}E(k+1)$ 의 표준편차를 상수  $\beta$ 로 사용하였다. 따라서 표적의 출현으로 오차신호의 에너지가 갑자기 증가되면 문턱값을 넘어서게 되고 이를 표적이 있음으로 결정한다. 표 1에 신호처리 과정을 정리하여 나타내고 있다.

### III. 실험

본 절에서는 모의실험을 통하여 제안한 방식의 성능을 확인하고 모의실험 결과를 분석한다.

#### 1. 모의실험 조건

모의실험에서 고려하는 해저면은 경기만 남부의 연안 해역에서 측정된 해저면의 표층 퇴적물의 비율을<sup>[10]</sup> 토대로 모의실험을 수행하였다. 고려한 해저면의 정보는 표 2에 해저면의 비율에 따라 정리하였다.

측정된 해저면의 퇴적물에 대한 후방산란강도는 람베르트 법칙에 Jackson과 Richardson이 제시한 해저면 후방산란 강도의 최적값을 적용시킨 값<sup>[11]</sup>과, APL-UW에서 측정된 재질별 입사각에 따른 후방산란강도 자료를 이용하였다<sup>[12]</sup>. 람베르트 법칙 모델의 후방산란강도는 다음과 같이 표현된다<sup>[13]</sup>.

$$BS_{LL} = 10\log\mu + 10\log(\sin^2\theta) \quad (27)$$

$\theta$ 는 수평입사각이고  $\mu$ 는 경험적으로 도출되는 비례 상수이다. Jackson과 Richardson은 위의 식의  $10\log\mu$ 의 최적값으로 모래 -20.2dB, 자갈 -11.7dB, 머드 -19.7dB를 제시하였다. Jackson과 Richardson이 제시한 람베르트 법칙의 해저면 후방산란 강도의 최적값은 고주파수(20kHz~140kHz)인 경우에 해당하지만, 본 논문에서는 중심주파수 13kHz, 대역폭 14kHz의 LFM 파형을 사용하므로 APL-UW에서 측정된 재질별 입사각에 따른 후방산란강도 자료를 참고하여 모의실험을 수행하였다. 그림 9는 APL-UW에서 측정된 해저면 재질별

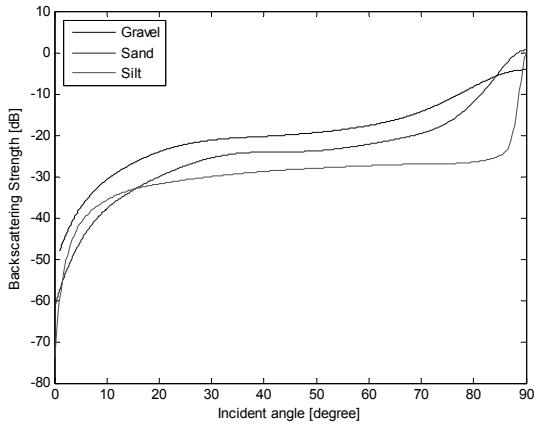


그림 10. APL-UW에서 측정한 해저면 재질별 각도에 따른 후방산란강도

Fig. 10. Backscattering strength depending on incident angles for each sediment measured by APL-UW.

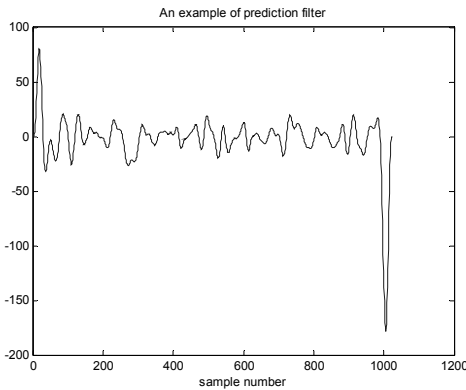


그림 11. 표적이 없는 해저면에 대한 예측 필터  $g(n, \theta_i^{(k)})$ 의 파형 예

Fig. 11. A waveform of the prediction filter  $g(n, \theta_i^{(k)})$  when no target is placed.

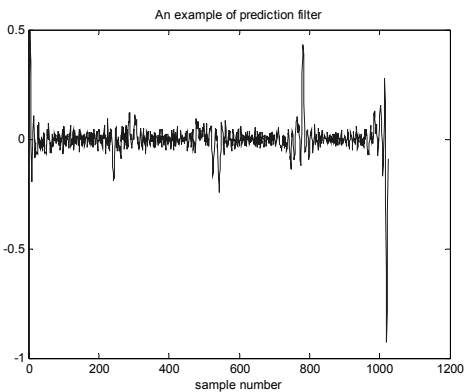


그림 12. 550 m에 표적이 있는 상황에서의 예측 필터  $g(n, \theta_i^{(k)})$ 의 파형 예

Fig. 12. A waveform of the prediction filter  $g(n, \theta_i^{(k)})$  when a target is placed at 550 m.

각도에 따른 후방산란강도를 보여준다.

모의실험이 수행된 수중환경은 그림 6에 나타나있다. 천해의 깊이는  $H = 100$  m, 음원과 수신기는 깊이  $L = 10$  m에 위치한다고 가정하였다. 소나신호의 수평 빔폭은  $3^\circ$ , 수직빔폭은  $0.5^\circ$ 로 가정하였으며, 음속은 1500 m/s, 표본화주파수 40 kHz로 하였다. 표 2와 같은 해저면에 직경 4 m 길이 20 m의 원통형 금속이 착저된 상태라고 가정을 하였으며, 그 위치는 그림 6에서 x축으로 500 m에서 1000 m 범위에 위치하는 것으로 가정하였다.

## 2. 모의실험 결과

### 가. 예측필터의 특성 비교

그림 11은 본 모의실험에서 잡음이 없을 때 표적이 없는 상황에서 추정된 수신신호간의 예측 필터  $g(n, \theta_i^{(k)})$ 의 파형 예를 보여주고 있다. 반면에 잡음이 없을 때 소나로부터 해저면에서 550 m에 표적이 있는 상황에서의 예측필터의 파형 예를 그림 12에 도시하고 있다. 그림 6에 도시한 것처럼 균일한 해저면에서는 수신신호의 특성이 거의 유사하기 때문에 예측필터의 형태가 그림 11과 같이 비교적 단순한 형태로 나타난다. 반면에 해저면에서 반사된 반사파와 표적으로 반사된 파형은 특성이 다르기 때문에 두 신호간의 관계를 모델링하는데 그림 12와 같이 상당한 복잡한 형태의 필터계수가 필요하다.

### 나. 오차신호의 변화

그림 13은 신호대잡음비 30 dB 상황에서 표적이 없을 때와 표적의 위치가 550, 950 m에 놓여 있을 때의 오차신호를 5 m 단위로 측정하고 수신신호의 에너지에 대한 오차신호의 상대에너지를 dB 스케일로 도시한 예제이다. 그림에서 보듯이 오차신호에 대한 평균적인 추이에 비하여 표적이 있는 위치에서 반사파를 예측한 결과는 상당한 차이를 보이고 있다. 이 그림을 통하여 알 수 있듯이 표적을 탐지하기 위해서는 탐지여부를 정하는 문턱값을 과거 오차신호의 에너지에 대한 이동평균 필터를 사용하여 환경에 적응적으로 정하여야 한다. 또한 중간에 표적이 있는 곳 이외에도 약간의 큰 오차가 발생하는 지점이 있으므로 적응적으로 정한 값에 일정한 상수를 더하여 문턱값을 정해야 한다.



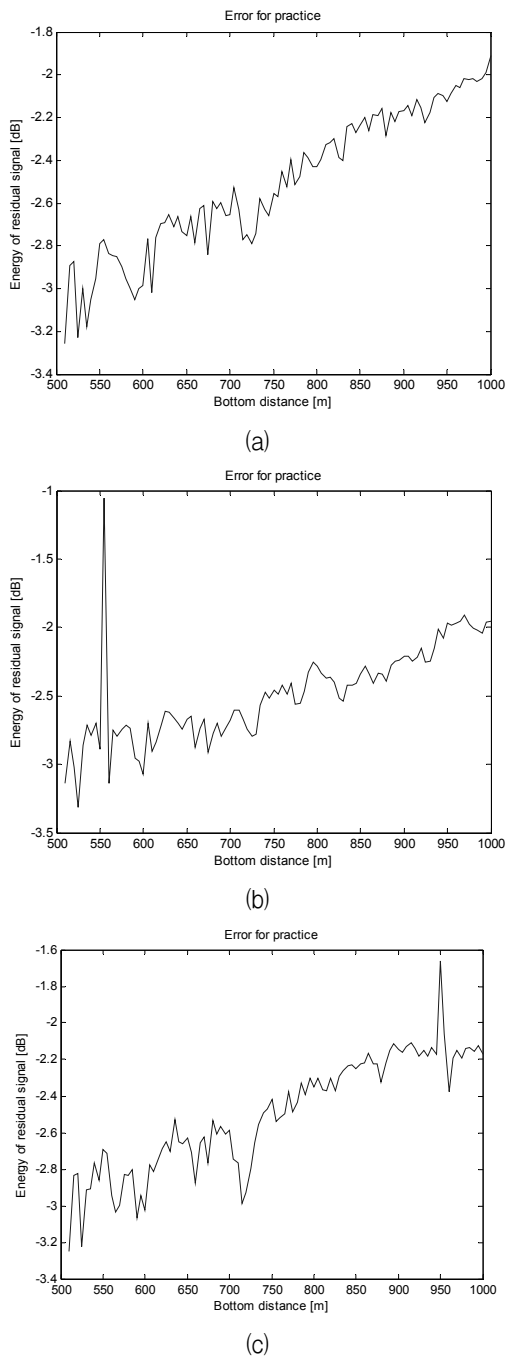


그림 13. 신호대잡음비 30dB 상황에서 표적이 없을 때와 표적이 550, 950 m에 위치하고 있을 때 소나로부터 해저면의 거리에 따른 오차신호의 에너지 변화

Fig. 13. Energy variations of the error signals with respect to distance from the sonar when SNR is 30 dB and no target (a), a target at 550 m (b), and a target at 950 m (c) are assumed, respectively.

#### 다. 탐지확률

그림 14에는 제안된 방법을 사용하여 Monte Carlo 모의실험을 통하여 측정된 신호대잡음비에 따른 탐지확

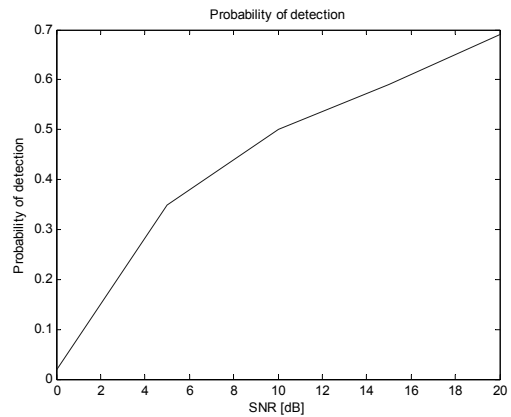


그림 14. 표적이 500m에서 1000m 사이에서 uniform 분포에 따라 존재할 때 탐지확률

Fig. 14. Probability of detection when a target is randomly located at the range from 500 to 1000 m with uniform distribution.

률을 보여주고 있다. 이 실험에서는 500에서 1000m 사이의 영역에 표적이 uniform distribution을 갖고 위치한다고 가정을 하고 이 랜덤한 위치를 제대로 찾는지를 신호대잡음비를 0 dB에서 20 dB까지 5 dB 단위로 각각 독립적인 100번의 실험을 수행하여 평균을 구한 것이다.

## IV. 결론

본 논문에서는 해저면에 착저된 원통형 표적을 탐지하기 위하여 해저면으로부터 반사파형으로 예측된 신호와 표적과 해저면으로부터 반사파의 차이를 나타내는 오차신호의 에너지를 계산하여 표적을 탐지하는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘에 대하여 다양한 신호대잡음비에 대하여 탐지확률을 모의실험을 통하여 확인하였다. 이 제안된 알고리즘의 장점으로서는 해저면의 상태를 정확하게 알지 못하는 상황에서 적용이 가능하다는 점이 있다. 또한 표적신호가 약해 바닥으로부터의 산란신호에 묻히게 되서 정합필터링과 문턱값을 적용하는 방식의 탐지가 어려운 경우에도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 단점으로는 해저면의 특성이 갑자기 바뀌는 경우 제안된 알고리즘에서는 오탐지의 확률이 높아진다는 점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 표적이 탐지된 상황에서 수신신호에 대한 분석을 통하여 원통형 표적이 갖는 반향의 특징을 찾아 오탐지확률을 개선하는 방법에 대한 연구가 추가로 필요하며, 추후 연구된 내용을 앞에서 제안한 예측필터를 이용한 방법과 함께 적용하여 탐지확률을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

## REFERENCES

- [1] E.C. Jeong, T.B. Shim, J.E. Kim, "Underwater Acoustic Image Classification of a Cylindrical object using the Hough Transformation and Nth Degree Polynomial Interpolation", Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea Vol. 50, NO.2, pp. 193-200, 2013.
- [2] J.E. Lee, T.B. Shim, "Research on Segmentation for Sidescan Sonar Image by Morphological Method", Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea vol. 49SP, NO.2, pp. 143-148, 2012.
- [3] M. Zampolli, A. Espana, K. Williams, S. Kargl, "Low- to mid-frequency scattering from elastic objects on a sand sea floor: Simulation of frequency and aspect dependent structural echoes," J. Comp. Acous. 20, (2012) [14 pages]
- [4] D. A. Abraham and A. P. Lyons (2002), "Novel physical interpretations of K-distributed reverberation," IEEE J. Oceanic Eng., vol. 27, pp. 800 - 813, Oct. 2002.
- [5] W.S. Moon, S.B. Im, I.S. Seo, "Analysis of a Scattering Model from an Cylindrical Target in Contact with a Sediment", The Korea Institute of Military Science and Technology Symposium 2015.
- [6] Z. Ye, "A novel approach to sound scattering by cylinders of finite length," J. Acoust. Soc. Am., vol. 102, no. 2, pp. 877-884, 1997.
- [7] D. A. Abraham and A. P. Lyons (2004), "Simulation of Non-Rayleigh Reverberation and Clutter", IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL. 29, NO. 2.
- [8] M. Stojanovic, "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel," WUWNet 2006(ACM), Los Angeles, California, USA, Sept. 2006.
- [9] L. Berkhovskikh and Y. Lysanov, Fundamentals of Ocean Acoustics "New York: Springer, 1982.
- [10] W.J. Son, S.U. Son, J.W. Choi, S.H. Cho, S.K. Jung, "Measurements of Monostatic Bottom Backscattering Strengths in Shallow Water of the Yellow Sea", The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.34, NO.6, pp. 444-454, 2015.
- [11] D. R. Jackson and M. D. Richardson, High-Frequency Seafloor Acoustics, (Springer, New York, 2006) pp. 171-175, 182-192, 237-238.
- [12] WASHINGTON UNIV SEATTLE APPLIED PHYSICS LAB, "APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook", OCT 1994.
- [13] K. V. Mackenzie, "Bottom reverberation for 530- and 1030-cps sound in deep water," J. Acoust. Soc. Am. 33, 1498-1504, 1961.

저 자 소 개



은 백 산(학생회원)  
2016년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2016년~현재 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정 재학중  
<주관심분야: 수중음향신호처리, 생체신호처리>



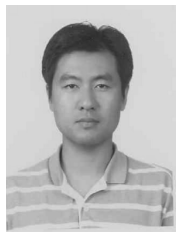
임 성 빈(정회원-교신저자)  
1986년 서울대학교 전자공학과 학사  
1988년 서울대학교 전자공학과 석사  
1994년 University of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터 공학과 박사

1995년~현재 숭실대학교 전자정보공학부 정교수  
<주관심분야: 수중신호처리, 비선형 신호처리, 통신 시스템, 저장장치시스템>



김 선 호(학생회원)  
2007년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2009년 숭실대학교 정보통신공학과 석사  
2009년~현재 숭실대학교 정보통신공학과 박사과정 재학중

<주관심분야: 수중신호처리, 통신신호처리, 생체신호처리, 선형·비선형 모델링>



서 익 수(정회원)  
1999년 명지대학교 전자전기공학과 학사  
2001년 연세대학교 전기컴퓨터공학과 석사  
2001년~현재 국방과학연구소 선임연구원

<주관심분야: 수중음향신호처리, 소나 표적탐지 및 추적, 표적 식별>



문 우 식(학생회원)  
2007년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사  
2009년 숭실대학교 정보통신공학과 석사  
2015년 숭실대학교 정보통신공학과 박사

2016년~현재 (주)솔리드  
<주관심분야: 적응 신호처리, 채널 모델링, 통신 시스템, 비선형 신호처리>