

# 음원과 수신기 사이에 교차 산란단면적을 이용한 양상태 잔향음 모의

## Bistatic reverberation simulation using intersection of scattering cross section between sound source and receiver

오래근,<sup>1</sup> 김선호,<sup>1</sup> 손수욱,<sup>2</sup> 최지웅,<sup>1†</sup> 박정수,<sup>2</sup> 신창홍,<sup>3</sup> 안명환,<sup>3</sup> 이범직<sup>4</sup>

(Raeeun Oh,<sup>1</sup> Sunhyo Kim,<sup>1</sup> Su-Uk Son,<sup>2</sup> Jee Woong Choi,<sup>1†</sup> Joung-Soo Park,<sup>2</sup> Changhong Shin,<sup>3</sup>  
Myonghwan Ahn,<sup>3</sup> and Bum Jik Lee<sup>4</sup>)

<sup>1</sup>한양대학교 해양융합공학과 해양음향연구실, <sup>2</sup>국방과학연구소, <sup>3</sup>LIG 넥스원, <sup>4</sup>대우조선해양

(Received November 9, 2016; accepted January 25, 2017)

**초 록:** 소나 운용에서 잔향음은 수중 표적 탐지의 제한요소이기 때문에 정확한 예측이 중요하다. 최근에는 단상태 소나 연구에서 공간적으로 송수신기의 위치가 다른 양상태 소나에 대한 연구로 확장되고 있는 추세이다. 양상태 잔향음을 모의하기 위해서는 양상태 음파전달, 양상태 산란강도 및 산란단면적 등에서 단상태와 다른 복잡한 계산이 요구된다. 전 세계적으로 양상태 잔향음에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있지만 잔향음을 예측하는데 중요한 요소인 양상태 산란단면적을 정확하게 계산하는 방법에 대한 연구는 미비하다. 본 논문에서는 거리 독립 환경의 양상태 잔향음 모의에서 두 원의 교차되는 면적을 응용하는 새로운 산란단면적 계산 방법을 제안한다. 최종적으로 본 논문의 양상태 산란단면적 계산 방법으로 모의된 잔향음 준위는 기존에 제안되었던 방법들의 예측값과 비교되며 2013년 5월에 수행된 해상 실험의 측정값과 비교를 수행하였다.

**핵심용어:** 양상태 잔향음, 산란단면적, 잔향음 모델

**ABSTRACT:** It is important to predict accurately reverberation level, which is a limiting factor in underwater target detection. Recently, the studies have been expanded from monostatic sonar to bistatic sonar in which source and receivers are separated. To simulate the bistatic reverberation level, the computation processes for propagation, scattering strength, and scattering cross section are different from those in monostatic case and more complex computation processes are required. Although there have been many researches for bistatic reverberation, few studies have assessed the bistatic scattering cross section which is a key factor in simulate reverberation level. In this paper, a new method to estimate the bistatic scattering cross section is suggested, which uses the area of intersection between two circles. Finally, the reverberation levels simulated with the scattering cross section estimated using the method suggested in this paper are compared with those estimated using the methods previously suggested and those measured from an acoustic measurements conducted in May 2013.

**Keywords:** Bistatic reverberation, Scattering cross section, Reverberation model

**PACS numbers:** 43.30.Gv, 43.30.Vh

## 1. 서 론

해양에서 소나를 이용하여 송신된 음파는 다양한 경로로 전파된다. 이때 경계면의 비균질성에 의해 산란되어 수신되는 음파들의 시간에 따른 합을 잔향

†Corresponding author: Jee Woong Choi (choijw@hanyang.ac.kr)  
Department of Marine Sciences and Convergence Engineering,  
Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan,  
Gyeonggi-do 15588, Republic of Korea  
(Tel: 82-31-400-5531)

음이라 하며, 경계면의 종류에 따라 체적, 해수면, 해저면 잔향음으로 구분된다.<sup>[1]</sup> 잔향음은 군사적인 목적의 능동 소나 운용에서 표적 반향음의 탐지를 제한하는 요소가 되며 특히 천해 환경에서는 심해에 비해 경계면의 산란이 빈번하게 발생하기 때문에 표적 탐지는 잔향음에 의해 더욱 제한된다.<sup>[2]</sup>

초기 잔향음 연구는 동일 위치에서 음파를 송수신하는 단상태 잔향음에 대한 연구로 시작되었지만, 그 연구범위는 표적 탐지의 효율성을 증가시키기 위해 송수신기가 공간적으로 분리된 양상태 연구로 확장되고 있다. 단상태 잔향음은 송신기와 수신기의 위치가 같기 때문에 음파의 송신과 수신 경로를 동일하게 가정함으로써 비교적 간단하게 계산이 가능하나, 양상태 잔향음은 송수신기의 기하학적 위치에 따른 계산 과정의 복잡성으로 인하여 현재까지도 많은 연구가 수행되고 있다.

잠수함의 소음 저감 기술이 발달함으로써 인한 탐지의 어려움을 극복하고 피탐의 위협을 줄이기 위해 양상태 소나의 필요성이 강조되고 있으며, 양상태 소나를 운용하기 위한 필수 요소인 양상태 잔향음 예측을 위해 다양한 음파전달 모델을 적용한 연구가 진행되고 있다. 미국을 포함한 많은 나라에서 포물선 방정식,<sup>[3]</sup> 정상모드이론,<sup>[4,6]</sup> 음선이론 기반<sup>[7, 8]</sup>의 잔향음 모델들이 연구되어졌고, 국내에서는 Kim *et al.*<sup>[9]</sup>이 포물선 방정식을 기반으로 천해에서의 양상태 잔향음 모델을 제안한 이후로 음선이론<sup>[10, 11]</sup>과 정상모드이론<sup>[12, 13]</sup>을 기반으로 한 양상태 잔향음 연구가 이루어졌다. 이러한 양상태 잔향음은 송수신기의 기하학적 구조에 의해 달라진 전달 경로를 계산하거나 양상태 경계면 산란을 고려하는 연구가 주를 이루어왔다. 하지만 양상태 잔향음을 신속하고 정확하게 계산하기 위해서는 경계면의 양상태 산란단면적을 계산하는 방법도 중요하다.<sup>[14]</sup>

양상태 산란단면적은 단위 면적에 대해 계산할 경우,<sup>[15]</sup> 경계면에 존재하는 모든 단위 면적에 대하여 양상태 산란강도를 계산하므로 실제 잔향음과 유사한 잔향음 모의가 가능하지만 신속한 연산에는 적합하지 않다. 또한 단상태 산란단면적 계산 방법으로 양상태 산란단면적 계산에 적용하는 경우에는 송신기로부터 경계면, 경계면에서 수신기에 대하여 계산

되는 산란단면적이 달라지기 때문에 정확한 양상태 산란단면적을 고려할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 양상태 산란단면적 계산 방법은 대표적으로 Cox<sup>[16]</sup>의 방법과 Weinberg<sup>[8]</sup>가 제안한 방법을 사용한다.

Cox는 송신기와 수신기의 위치를 기준으로 한 타원의 면적을 이용하여 양상태 산란단면적을 계산하였는데, 이 경우에는 송신기와 수신기 사이에 직접 파도달 시간구간으로 인한 음영구역이 존재하게 된다. Weinberg는 송신기 및 수신기를 기준으로 방위각 및 수평거리 간격을 이용하여 단위 면적을 극좌표계로 설정하여 산란단면적을 계산하고, 이를 시간에 따른 함수로 변환하여 잔향음 계산에 적용하는 방법을 이용하였다. 이 경우 송수신기 각각의 산란단면적을 독립적으로 계산한 후 보정하는 방법으로 양상태 산란단면적을 계산함으로써, 송수신기 간의 수평거리가 가까울수록 효율적인 방법으로 제한점을 가진다.

본 연구에서는 양상태 소나 시스템에서 원의 교차되는 넓이를 이용하여 새로운 양상태 산란단면적 계산 방법을 제안하고, 이 방법을 통해 시간에 따른 잔향음 준위를 모의한다. 모의된 잔향음 결과는 기존의 양상태 산란단면적 계산 방법으로 모의된 잔향음 준위와 비교를 통해 검증한다. 또한 시간영역에서 모의된 양상태 잔향음 신호를 양상태 해상실험 결과와 비교하여 그 정확성 및 효율성을 검증한다.

본 논문의 II장에서는 양상태 잔향음 계산 방법과 제안하는 양상태 산란면적 계산 방법에 대해 자세히 설명하고 III장에서 기존 양상태 산란면적 계산 방법을 통해 모의된 잔향음 준위와 비교 분석을 수행한다. IV장에서 해상 실험 결과와 비교 분석을 수행하여 양상태 산란단면적 계산 방법에 대한 타당성을 검증하고 V장에서는 본 논문의 결론 및 토의를 제시한다.

## II. 양상태 잔향음 계산

### 2.1 양상태 잔향음 계산 알고리즘

해양에서 잔향음은 음파가 음향학적 성질이 다른 매질의 경계면에서 산란되어 수신되는 음파들의 시

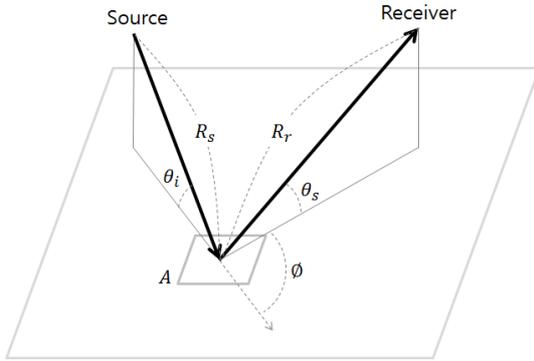


Fig. 1. Eigenray path on the scattering cross section for bistatic reverberation modeling.

간에 따른 총합이기 때문에 모의를 위해서는 송수신기로부터 산란단면적까지 고유음선 정보가 필수적이다. 본 논문에서는 제안하는 산란단면적 계산 방법의 효율성만을 검증하기 위하여 거리 독립 해지면과 등속 음속 구조를 가정하여 잔향음을 계산하였다.

Fig. 1은 양상태 해지면 잔향음 계산을 위한 기하학적 송수신기 위치와 산란면적을 나타낸 모식도로써 송수신기로부터 해지면까지의 직접파만을 고려한 그림이다. 송수신기로부터 전파된 음파는 산란단면적(A)까지  $R_s$ 의 경로로 전파되며 이때 수평 입사각과 산란각, 양상태 방위각은 각각  $\theta_i$ ,  $\theta_s$ ,  $\phi$ 이다. 경계면에서 산란된 음파는 수신기까지  $R_r$ 의 경로로 수신기까지 전파된다.

시간영역의 잔향음을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$RL(t) = I_0 \int \sum_m \sum_n T_m T_n S(\theta_m, \theta_n, \phi_{mn}) dA, \quad (1)$$

여기서  $RL(t)$ 은  $t$ 시간에 수신된 잔향음 강도이고,  $I_0$ 는 음원 강도,  $T_m$ ,  $T_n$ 은 각각 음원으로부터 특정 산란단면적까지  $m$  경로에 대한 전달손실과 특정 산란단면적으로부터 수신기까지  $n$  경로에 해당하는 전달손실을 의미한다.  $\theta_m$ ,  $\theta_n$ ,  $\phi_{mn}$ 는 각각  $m$ ,  $n$  경로에서 음파의 수평 입사각, 산란각 그리고 양상태 방위각을 의미하고  $S$ 는 이 세 각도를 고려한 단위 면적당 양상태 산란강도를 의미한다.<sup>[4, 14]</sup>

잔향음 준위 모의에 사용된 전달손실은 송수신기와 경계면까지의 전달거리에 대해 확산손실과 흡수

손실 모델을 고려하였다. 확산손실의 경우 구형분산을 고려하였고 흡수손실은 Francois와 Garrison에 의해 제안된 모델<sup>[17]</sup>을 적용하여 계산하였다. 또한 해지면 반사 손실은 Rayleigh 반사 모델<sup>[18]</sup>을 이용하였고 산란 모델은 양상태 산란에 대해 계산이 가능한 이론식 기반의 APL-UW 산란 모델<sup>[19]</sup>을 사용하였다.

## 2.2 양상태 산란단면적 계산 알고리즘

단상태에서 송신기로부터 경계면으로 전달되는 음파가 전방위에 대해 등방성을 만족한다면 경계면에서의 산란단면적은 동일한 전달거리와 입사각으로 이루어진 원형 띠모양이 되며,  $2\pi r dr$ 로 계산이 가능하다. 여기서  $r$ 은 송신기로부터 산란단면적까지 수평 거리,  $dr$ 은 계산하고자 하는 면적의 거리 증가분이다.<sup>[4]</sup> 단상태의 경우<sup>[20]</sup> 신호 길이의 왕복시간을 고려하여  $dr$ 을  $\frac{ct}{2} \cos\theta$ 로 단순 계산할 수 있지만 양상태의 경우에는 송신기로부터 계산된 단상태 산란단면적 내에서 수신기까지의 전달 경로를 동일하게 고려할 수 없으므로 양상태에 대한 효율적인 계산 방법이 요구된다. 따라서 Cox<sup>[16]</sup>는 양상태에 대한 산란단면적을 고려하기 위하여 송수신기를 기준으로 등방성 타원을 구성하여 양상태 산란단면적으로 계산하였다. 이 경우 전달 시간이 동일한 면적이기 때문에 같은 전달 손실을 적용 가능하지만 송수신기 사이에 음영구역이 존재하게 된다. 또한 Weinberg<sup>[8]</sup>는 수신기를 기준으로 단상태 산란단면적을 계산한 후에 송신기로부터 산란단면적까지의 입사각과 방위각을 고려하여 양상태 산란단면적으로 보상하는 방법을 적용하였다. 이 방법은 양상태 잔향음 계산시 음영구역은 존재하지 않지만 정확한 산란단면적을 계산하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 기존 방법들의 제한사항을 극복하기 위해 음영구역 없이 정확한 산란단면적을 고려할 수 있는 양상태 산란단면적 계산 방법을 제안한다.

본 논문의 양상태 산란단면적 계산 방법은 송신기를 기준으로 하는 두 개의 원과 수신기를 기준으로 하는 두 개의 원의 교차 면적을 계산하여 구할 수 있으며 그 계산 방법은 Eq. (2)와 같다.  $O_{s1}$ 와  $O_{s2}$ 는 송신기로부터 반지름이  $dr$  만큼 차이가 나는 두 개의

원이고 두 원의 사이 면적에서는 송신기로부터 경계면까지 동일한  $R_s$ 의 전달 경로를 고려한다.  $O_{r1}$ 와  $O_{r2}$ 도 마찬가지로 수신기로부터 반지름이  $dr$ 만큼 차이가 나는 두 원이며 경계면으로부터 수신기까지 동일한  $R_r$ 의 전달 경로를 고려한다. 따라서 네 원의 교차 면적을 양상태 산란단면적으로 고려할 경우, 송신기로부터 경계면까지  $R_s$ 의 전달 경로와 경계면으로부터 수신기까지  $R_r$ 의 전달 경로를 적용 가능하다.

$$A = O_{s1} \cap O_{r1} - O_{s1} \cap O_{r2} - O_{s2} \cap O_{r1} + O_{s2} \cap O_{r2}. \quad (2)$$

네 원이 교차되는 양상태 산란단면적( $A$ )은 두 원의 교차 면적들을 산술 연산하여 계산이 가능하다. Fig. 2는 계산과정의 이해를 돕기 위해 Eq. (2)를 표현한 그림이며, 회색 면적은 원의 관계를 통해 구한 면적이다. 양상태 산란단면적 Fig. 2(a)를 구하기 위해서 가장 큰 교차 면적(b)에서 (c)와 (d)의 면적을 빼고

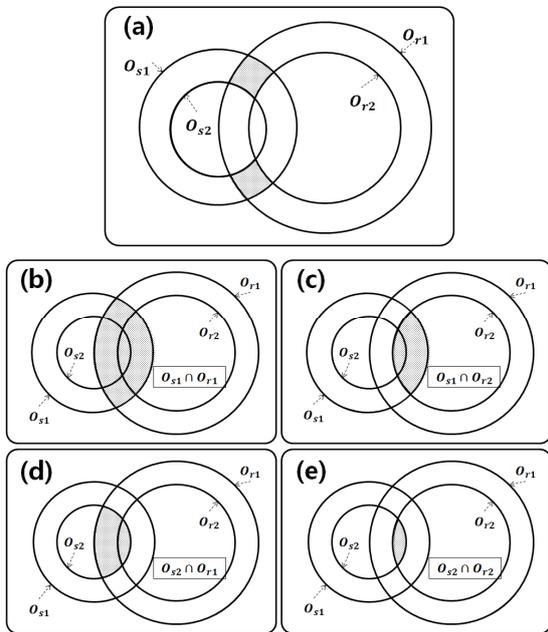


Fig. 2. The computation steps of bistatic scattering cross section using two circles ( $O_{s1} > O_{s2}$ ) based on source and two circles ( $O_{r1} > O_{r2}$ ) based on receiver. (a) Bistatic scattering cross section ( $O_{s1} \cap O_{r1} \cap O_{s2}^c \cap O_{r2}^c$ ), (b)  $O_{s1} \cap O_{r1}$ , (c)  $O_{s1} \cap O_{r2}$ , (d)  $O_{s2} \cap O_{r1}$ , (e)  $O_{s2} \cap O_{r2}$ .

(c)와 (d)의 중복되는 면적인 (e)를 더하여 네 원 사이의 면적을 계산한다.

두 원의 교차 면적  $S$ 는 반지름과 끼인각으로 결정되는 부채꼴과 삼각형의 넓이를 이용하여 Eq. (3)과 같이 계산 가능하다.

$$S = \frac{1}{2} [r_m^2 (\phi_s - \sin \phi_s) + r_n^2 (\phi_r - \sin \phi_r)],$$

$$\phi_s = 2 \cos^{-1} \left[ \frac{D^2 - (r_m^2 - r_n^2)}{2r_m D} \right],$$

$$\phi_r = 2 \cos^{-1} \left[ \frac{D^2 + (r_m^2 - r_n^2)}{2r_n D} \right], \quad (3)$$

이때  $D$ 는 송신기와 수신기 사이의 수평 거리를 의미하고  $\phi_s$ 와  $\phi_r$ 는 각각 송신기와 수신기에서의 교점으로 생성되는 부채꼴의 중심각을 의미하며  $D$ 와 송신기와 수신기 각각으로부터의 반지름  $r_m, r_n$ 을 통하여 계산 가능하다. 즉 Eq. (3)을 Eq. (2)에 대입함으로써 네 원 사이에 해당하는 면적을 구할 수 있고 이 면적이 양상태 산란단면적이 된다.

Fig. 3은 본 논문에서 제안하는 산란단면적 계산 방법으로 구해진 산란단면적 모식도이다. 실선으로 이루어진 원은 송신기로부터  $dr$ 을 간격으로 하는 원이며, 거리 독립 환경을 가정한다면 두 실선 원의 사이의 회색 산란 면적은 송신기로부터 경계면까지 동일한 전달 손실과 수평 입사각을 가진다. 그 후, 회색 면적에서 수신기까지의 전달 손실을 계산하기 위해 수신기로부터  $dr$ 의 간격을 갖는 점선으로 이루어진 원들을 고려한다. 송신기를 기준으로 하는 것과 마찬가지로 점선의 원들 사이의 면적에서는 경계면으

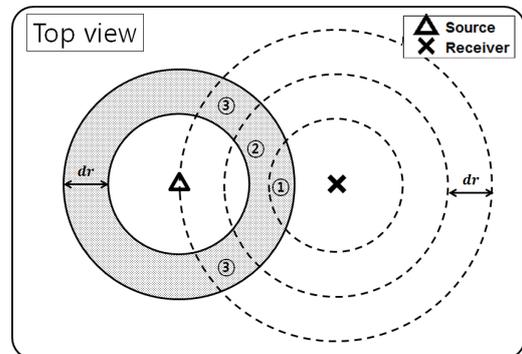


Fig. 3. Example of bistatic scattering cross section.

로부터 수신기까지 동일한 전달 손실과 수평 산란각을 고려할 수 있다. 결과적으로 송신기로부터 경계면까지 전달 손실과 수평 입사각이 동일한 회색의 산란 면적에서 각 점선의 원들과 교차되는 면적을 계산하여 수신기까지 각각 같은 전달 손실과 수평 산란각을 적용할 수 있는 면적(①, ②, ③)으로 구분 가능하다. 면적 ①, ②, ③은 송신기로부터 경계면까지의 전달손실은 모두 같지만 경계면으로부터 수신기까지 전달 손실이 ①, ②, ③ 순서대로 증가하므로 총 전달 손실은 ①이 가장 작고 ③이 가장 크다. ③ 구역은 두 개로 나뉘어 있지만 산출되는 면적은 두 면적이 더해진 하나의 값으로 계산된다. 즉 등방성을 만족한다면 산란단면적은 송신기와 수신기를 이은 직선으로부터 대칭이 되기 때문에 한 구역의 양상태 산란강도만 계산하여도 두 구역의 산란단면적에 대한 적용이 가능하며 이를 통해 잔향음 계산 시간을 단축할 수 있다. 산란강도를 계산하는 경계면의 위치인 산란 지점은 산란단면적의 중앙에 해당한다. 본 논문에서는  $dr$ 을 송신기와 수신기에 대해 각각  $c\tau/\cos\theta_i$ ,  $c\tau/\cos\theta_s$ 으로 계산하였다. 여기서  $c$ 는 음속,  $\tau$ 는 송신 신호 길이,  $\theta_i$ 와  $\theta_s$ 는 수평 입사각과 산란각을 뜻한다.

### III. 양상태 산란 모델 비교

기존의 양상태 산란단면적 계산 방법은 Weinberg<sup>[8]</sup>와 Cox<sup>[16]</sup>가 제안한 방법을 사용하였으며, Fig. 4는 기존 방법들과 제안한 방법을 사용하여 산란 지점을 구한 예시이다. Fig. 4(a)는 Weinberg의 방법으로 수신

기로부터 일정한 거리 간격과 방위 간격을 정하여 산란단면적을 계산한다. 하지만 구해진 산란단면적은 수신기만 고려되었기 때문에 잔향음을 계산할 때, 송신기로부터의 수평 입사각과 방위각을 고려한 파라미터를 통해 추가적인 계산이 요구된다. Fig. 4(b)는 Cox의 방법으로 송수신기로부터 동일한 거리를 가진 타원의 위치를 산란 지점으로 계산하기 때문에 전달 손실이 같은 산란단면적을 구할 수 있는 장점이 있지만 송신기와 수신기 사이에 음영구역이 존재하게 된다. 또한 두 가지 방법 모두 방위 간격을 임의로 설정해야 한다. 간격을 좁게 정할수록 그 결과의 신뢰도는 커지지만 연산량의 증가로 인한 계산 시간이 증가하며, 간격을 넓게 정할 경우에는 연산량은 감소하지만 결과의 신뢰도는 작아진다. 이와 같이 방위 간격을 결정하는 것은 중요하지만 상황에 따른 방위 간격에 대한 적절한 기준이 정의되어 있지 않기 때문에 방위 간격 결정에 어려움이 따른다. Fig. 4(c)는 본 연구에서 제안한 방법으로  $dr$ 의 거리 간격을 가진 원들의 교차 면적으로 계산된다. 계산된 산란단면적 안에서는 동일한 전달 손실을 적용 가능하기 때문에 Weinberg의 방법과 같이 추가적인 계산을 하지 않으며, 송수신기 사이의 구역에 대해서도 Cox의 방법에서 존재하는 음영구역 없이 모든 구역을 계산 가능하다. 또한 제안하는 방법은 방위각을 일정 간격으로 정하지 않으며 송수신기의 기하학적 위치와  $dr$ 에 따라 산란 지점이 결정된다.

Fig. 5는 Weinberg의 방법으로 계산할 때 발생할 수 있는 알고리즘의 제한점으로 수신기를 기준으로 한 계산 방위각 설정에 따라 모의된 잔향음 준위가 다

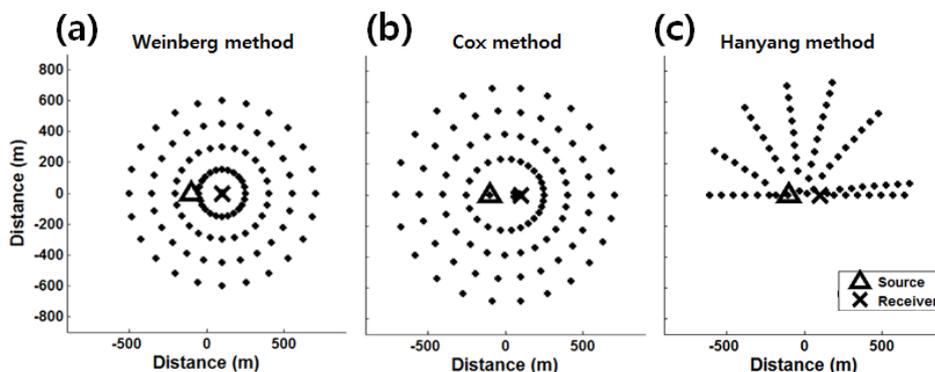


Fig. 4. Comparison of bistatic scattering positions. (a) Weinberg method, (b) Cox method, (c) Hanyang method.

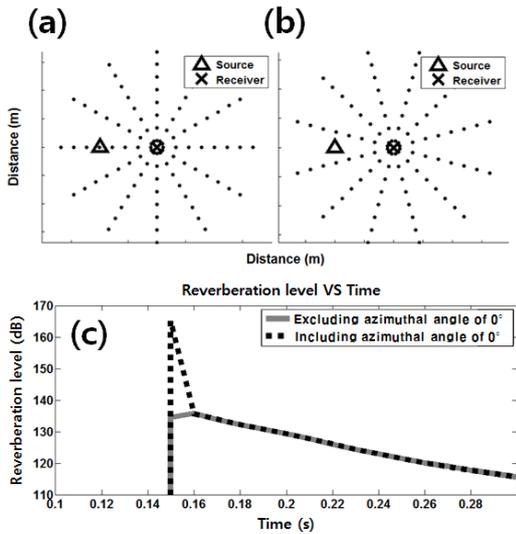


Fig. 5. Computation of reverberation levels with different reference positions for scattering cross section calculation. (a) reference positions including azimuthal angle of 0°, (b) reference positions excluding azimuthal angle of 0°, (c) simulation result of reverberation levels.

를 수 있음을 보여준다. Fig. 5(a)와 같이 송수신기 사이의 양상태 방위각이 0°인 위치를 산란 지점으로 계산하였을 경우에는 높은 산란강도가 양상태 산란단면적에 반영되기 때문에 잔향음이 높게 모의된다. 반대로 Fig. 5(b)와 같이 양상태 방위각이 0°인 위치를 제외하고 산란강도가 낮은 위치를 산란 지점으로 적용할 경우에는 잔향음이 낮게 모의될 수 있다.

산란단면적 계산 방법의 비교를 위해 각각의 양상태 산란단면적 계산 방법을 이용하여 단순한 해양환경에 대한 잔향음을 모의하였다. Fig. 6(a)는 해저면 잔향음 모의에 사용된 송수신기의 위치를 나타낸다. 모의한 해양환경의 음속은 1500 m/s 인 수직 등속 구조이며, 음원 준위 208 dB re 1  $\mu$ Pa, 평균 입도 3  $\phi$ , 총 수심 80 m 의 천해 거리 독립 환경으로 설정하였다. 무지향성 송신기 수심 10 m, 수신기 수심 60 m, 송수신기 사이 거리 200 m로 설정하였으며 신호길이 10 ms 인 경우에 대한 해저면 잔향음을 모의하였다. 산란 단면적 계산 방법의 검증을 위해 유한요소법(Finite Elements Method, FEM)을 기준으로 사용하였다.<sup>[15]</sup> FEM은 산란강도를 모든 단위 면적에 대해 계산하기 때문에 많은 연산이 필요하지만 가장 실제에 가까운 모의가 가능한 방법이다. 따라서 FEM 방법을 기준

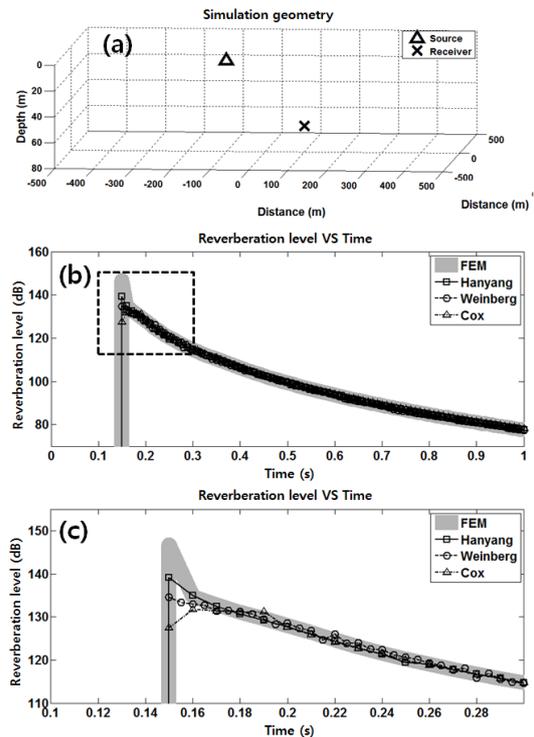


Fig. 6. Simulation results of bistatic reverberation levels. (a) source and receiver positions used in the simulation of reverberation levels, (b) simulation result for 0 ~ 1 s. (c) simulation result for 0.1 ~ 0.3 s.

으로 양상태 산란단면적 계산 방법을 비교하였다. Fig. 6(b)는 0 s에서 1 s까지 모의된 양상태 해저면 잔향음 결과이며, 잔향음이 수신되기 시작하는 부분을 제외한 외곽 산란단면적 부분의 모의 결과가 4가지 방법(FEM, Hanyang, Weinberg, Cox) 모두 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 점선의 네모박스로 표시한 송수신기 사이의 산란단면적에 해당하는 잔향음 시작 부분에서는 방법에 따라 다른 결과가 모의된다. Fig. 6(c)는 해당 부분을 확대한 그림이다. 먼저 Cox의 방법으로 산란단면적을 계산할 경우에는 음영구역이 존재하여 잔향음을 계산하지 못하는 면적이 생기고 그에 따라 잔향음의 처음 부분에 대해 정확한 모의가 불가능하다. 본 비교에서는 음영구역을 최소한으로 설정하였기 때문에 0.15 s에 잔향음이 존재하기는 하지만 음영구역으로 누락된 산란단면적으로 인해 모의된 잔향음 준위가 127 dB re 1  $\mu$ Pa로 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. Weinberg의 방법으로 모의한 0.15 초의 잔향음 준위는 135 dB re 1  $\mu$ Pa으로 Cox

의 방법보다 송수신기 사이의 산란단면적에 해당하는 잔향음이 기준 잔향음 준위(FEM, 147dB re 1  $\mu$ Pa)에 더 가깝지만 약 12 dB의 차이가 존재한다. Weinberg의 방법은 송수신기 사이의 면적에 대해 고려가 가능하지만 설정 방위에 따라 산란단면적을 계산하기 때문에, 설정 방위에 따른 산란 지점의 위치에 의해 모의된 잔향음 준위는 크게 변한다. 따라서 방위간격을 좁게 설정해야 하며, 좁게 설정하더라도 단상태 산란단면적을 양상태로 보상하기 때문에 그 결과는 정확하지 않을 수 있다. 반면에 Hanyang 방법으로 계산한 0.15 s의 잔향음 준위는 139 dB re 1  $\mu$ Pa 으로 기준 잔향음보다 8 dB 낮지만 가장 유사한 결과를 나타내며  $dr$ 을 작게 설정할수록 잔향음 준위는 FEM 방법의 결과에 가까워진다.

#### IV. 해상 실험 결과와 모의 결과 비교

본 논문에서 모의된 시간에 대한 양상태 잔향음 준위 결과를 검증하기 위하여 서해에서 수행된 해상 실험 결과<sup>[21]</sup>와 비교하였다. 해상 실험은 2013년 5월에 경기만 태안반도 서쪽 해역에서 실시되었으며, 주파수는 10 kHz, 신호 길이는 3 ms가 사용되었다. 송수신기 수심은 각각 조사선 후미와 부이에 9 m, 15 m로 설치하였고 송수신기 사이 수평거리가 42 m인 경우에 대해 모의 결과와 비교를 실시하였다.

Fig. 7은 실험 해역의 수직 음속 구조와 직접파, 해수면 반사파, 해저면 반사파의 고유 음선을 모델링한 결과로 전달 경로를 통해 직접파가 가장 먼저 수신된 후 해수면, 해저면 반사파의 순서로 신호가 수

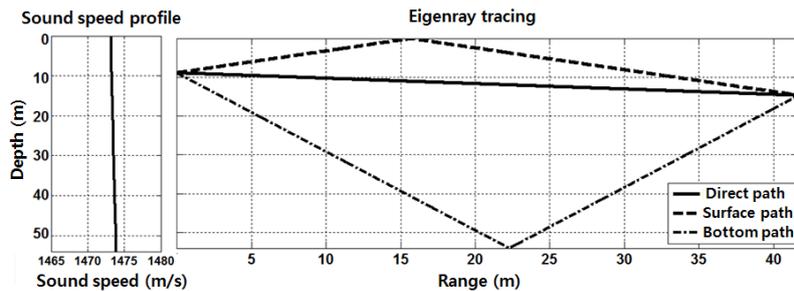


Fig. 7. Sound speed profile (left) and eigenray tracing (right) for experimental site.

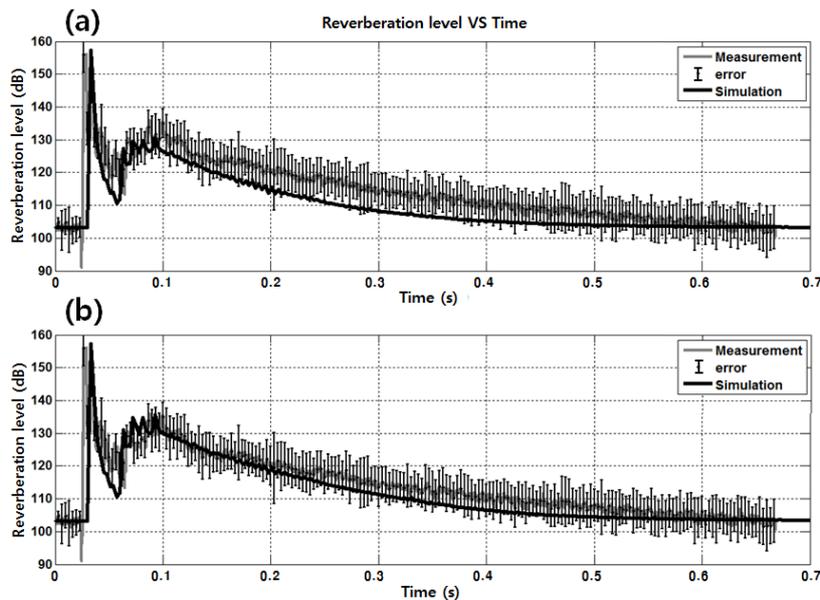


Fig. 8. Comparison of measured reverberation level and the simulation results predicted using mean grain sizes of (a) 5.9  $\phi$  and (b) 4  $\phi$ .

신되는 것을 확인할 수 있다. 수직 음속 구조는 실험 전후로 측정되었으며 전수층에 대해 1473 m/s에서 1 m/s 이내로 변하고 파고는 0.2 m 이하인 안정적인 환경이었다. 따라서 본 논문에서는 수직 등속 음속 구조와 거리 독립 환경으로 단순화시켜 잔향음을 모의하였고 잔향음 모의의 정확도를 높이기 위하여 송신기로부터 경계면, 경계면으로부터 수신기 사이의 고유 음선은 경계면에 4번 반사되어 도달하는 음선까지 적용하여 모의하였다.

Fig. 8은 해상 실험에서 측정된 양상태 잔향음과 모의된 양상태 잔향음을 비교한 결과이다. 측정된 데이터는 굵은 회색 실선으로 30핑의 평균 잔향음 준위를 나타내었고 표시된 에러바는 수신된 30핑의 표준편차이다. 송수신기 간 고유음선 정보를 통해서 확인한 결과 직접파는 27 ms, 해수면 반사파는 33 ms, 해저면 반사파는 67 ms에 수신되었다. 잔향음은 해수면과 해저면으로부터 수신되는 산란음을 수신하는 것이기 때문에 직접파는 모의 결과에 포함하지 않는다. Fig. 8(a)는 해저면의 평균 입도를 측정값인 5.9  $\phi$ 로 모의한 결과이며 전체적으로 실제 측정값보다 낮은 잔향음 준위가 모의되었는데, 이는 해저면 평균입도의 큰 표준 편차(4.34  $\phi$ ) 때문으로 추정된다. 입도분석으로 측정된 해저 퇴적물의 구성은 자갈 9%, 모래 29%, 실트 26%, 점토 35%이다. 구성 입자의 크기가 다양하기 때문에 이로 인해 평균 입도 적용에 어려움이 존재한다. 윤 등<sup>[21]</sup>이 같은 해역에서 해저면 반사손실 비교를 통해 해저면 평균입도 역산을 수행한 결과 4  $\phi$ 의 평균입도가 예측되었다. Fig. 9의 해저면 반사손실 모의 결과에서 확인할 수 있듯이 평균입도 4  $\phi$ 의 해저면에서는 모든 입사각에서 반사손실이 5.9  $\phi$ 보다 작으며 특히 약 18°의 수평입사각에서는 전투과각(angle of intromission)의 존재 유무가 달라지며 반사손실의 차이가 커진다. Fig. 8(b)는 해저면 평균입도를 역산 결과인 4  $\phi$ 로 적용하여 잔향음을 모의한 결과이며 해저면 잔향음이 우세한 환경이기 때문에 전체적으로 모의한 잔향음 준위가 증가하며 실측값과의 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 측정된 해저면의 평균입도는 5.9  $\phi$ 이지만 잔향음에 영향을 미치는 음향학적 해저 지질 입자크기는 측정값과 다를 수 있음을 의미하며 환경

파라미터의 적용에 주의가 필요함을 보여준다. 또한 약 250 ms에서 측정 잔향음 준위가 모의 잔향음 준위보다 약 4 dB 커지는데 이것은 평탄한 해저면을 가정하여 모의한 것과 달리 해저 지형의 경사가 존재하기 때문인 것으로 보여진다. 주변 소음보다 높은 잔향음 준위가 수신되는 구간은 거리상으로 약 300 m 이내이다. Fig. 10(a)은 MBES(Multi-Beam Echo Sounder)로 측정된 해저면을 나타내며 검은 점선으로 이루어진 원은 송신기로부터 반지름이 300 m인 원을 나타낸다. 원 안의 해저 지형은 비교적 평탄하지만 방위각 90°의 200 m 부근에서 해저면이 약 4 m 상승하는 것을 확인할 수 있으며 Fig. 10(b)는 송신기로부터 방위각 90°에 대한 거리별 해저면 수심을 나타낸다. 수평

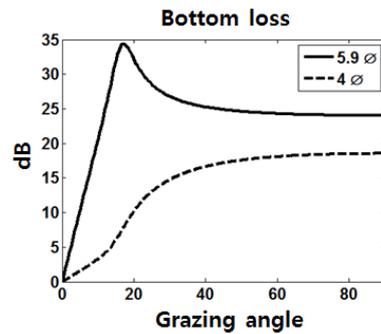


Fig. 9. Bottom loss modeling results with two differential mean grain sizes (5.9  $\phi$  and 4  $\phi$ ).

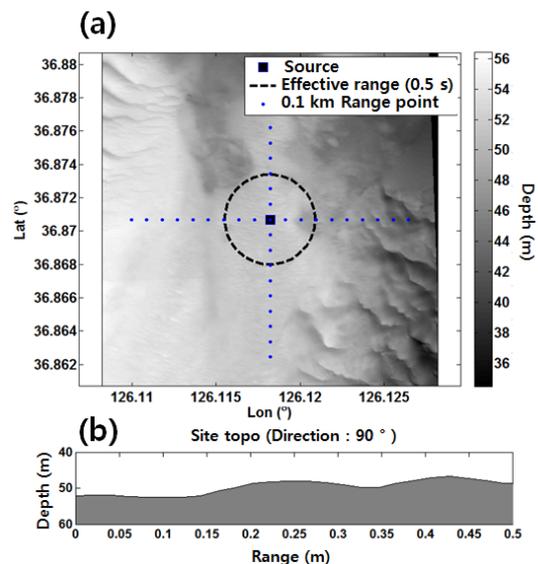


Fig. 10. (a) High-resolution bathymetry measured by multi-beam echo sounder, (b) bathymetry in east direction.

거리 200 m 에서 산란된 잔향음은 수신기에 약 0.27 s 에 도달하는데 약 150 m부터 해저면이 상승하기 시작하는 것을 감안할 때 이는 실측 잔향음 준위가 모의 결과보다 높아지는 시간과 일치한다.

## V. 결론 및 토의

양상태 잔향음 모델은 송신기로부터 송출된 음파가 수신기에 도달하기까지의 물리적 기작을 이해하고 양상태 소나를 개발 및 운용하기 위해 중요하다. 본 논문에서는 양상태 잔향음 모델의 성능 향상을 위해 새로운 양상태 산란단면적 계산 방법을 제안하였다. 기존의 양상태 산란단면적 계산 방법은 산란단면적이 잔향음 계산에서 누락되는 음영구역이 존재하거나, 산란단면적을 단상태에서 양상태로 보상하여 산란단면적이 부정확한 단점이 존재하지만 본 연구의 방법으로 보완이 가능하다. 본 연구에서 제안한 방법은 송수신기로부터 일정한 전달 거리를 반지름으로 하는 원들의 관계를 통해 쉽게 양상태 산란단면적을 계산할 수 있으며 계산된 산란단면적을 통해 모의된 양상태 잔향음을 검증하기 위해 기존 양상태 산란단면적 계산 방법을 통해 모의된 잔향음을 비교하고 해상 실험으로 획득된 양상태 잔향음을 모의하였다.

본 논문은 산란단면적 계산 방법을 통한 양상태 잔향음 모델의 성능 향상에 그 목적을 두고 있기 때문에 특정 주파수 범위를 정하여 모델링을 수행하지 않았으며, 목표 주파수에 따라 본 논문의 산란단면적 계산 방법과 경계면 산란 모델을 적절하게 적용하여 원하는 주파수 대역의 양상태 잔향음을 모의할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 제안한 양상태 산란단면적 계산 방법이 FEM 계산 방법에 가장 유사한 결과를 보임을 확인하였고 양상태 해상 실험 데이터와 비교를 통하여 본 연구에서 제안한 양상태 산란단면적 계산 방법으로 모의된 양상태 잔향음의 정확성을 확인하였다. 본 연구에서 제시하는 산란단면적 계산 방법의 정확성 검증은 초기 잔향음의 고려 여부를 통해 확인하였다. 일반적으로 군사적인 목적으로 양상태 소나는 장거리 표적 탐지의 성능을 높이기 위해 이용된다. 만약 천해와 같이 수심이 낮

은 환경에서는 송신기와 수신기간의 전달시간과 신호의 길이를 이용하여 계산되는 표적을 탐지할 수 없는 직접파 도달 시간 구간이 발생하여 초기 잔향음의 경우 중요하지 않게 된다. 반면에 심해와 같이 수심이 깊은 환경에서는 직접파 도달 시간 구간이 초기 해저면 잔향음 시간 보다 상대적으로 빠르게 도출될 것이고, 이 경우 표적 신호에 영향을 미치게 된다. 또한 양상태 잔향음 신호를 이용한 해저면 구성 성분 역산 및 양상태 소나를 이용한 해양 탐사 등과 같은 연구에서는 초기 잔향음이 중요한 신호가 되므로, 본 연구에서 제안하는 방법이 중요하게 적용될 수 있을 것이다.

본 연구에서 제안한 양상태 산란단면적 계산 방법은 거리 독립 환경에 대한 방법으로 실제 해상에서의 해저면 거칠기와 해저면의 수심 변화를 고려하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 거리종속 해저면을 예로 들면, 송신기에서 산란단면적까지의 입사각, 산란단면적에서 수신기까지의 산란각에 거리종속 경계면 기울기 벡터를 고려하여 본 연구에서 제안하는 산란단면적 계산 방법에 보정해주는 것이 하나의 방법이 될 수 있다. 또한 송수신기 사이의 산란면적에서는 같은 전달 손실을 가지는 산란단면적 내에서도 산란 지점에 대한 입사각과 산란각이 크게 변하기 때문에 정확한 잔향음 모의를 위해서는 산란강도 계산 위치를 효과적으로 설정하기 위한 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 논문은 LIG넥스원[계약번호: LIGNEX1-2015-0162(00)], 국방과학연구소(관리번호: UD160006DD)에서 지원하여 이루어졌다.

## References

1. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound* (McGraw-Hill, New York, 1983), 237-290.
2. M. Schafer and M. Coran, "Submarine hunting in shallows," in Proc. UDT, MAST and COE Conference, 1-4 (2009).
3. H. G. Schneider, Vertically bistatic reverberation and

- the back propagated field with the split step PE, Saclant Undersea Research Ctr. Rept., SR-225 1994.
4. D. D. Ellis, "A shallow water normal mode reverberation model," *J. Acoust. Soc. Am.* **97**, 2804-2814 (1995).
  5. C. H. Harrison, "Closed form bistatic reverberation and target echoes with variable bathymetry and sound speed," *IEEE J. Oceanic Eng.* **30**, 660-675 (2003).
  6. K. D. LePage and C. H. Harrison, "Bistatic reverberation benchmarking exercise: BISTaR versus analytic formulas," in *Proc. J. Acoust. Soc. Am.* **113**, 2333-2334 (2003).
  7. R. L. Culver and S. T. McDaniel, "Bistatic ocean surface reverberation simulation," in *Proc. IEEE ICASSP*, **2**, 1453-1456 (1991).
  8. H. Weinberg, "CASS Roots," in *Proc. MTS/IEEE Oceans 2000 Conf. Providence, Rhode Island*, 1071-1076 (2000).
  9. N. Kim, S. Oh, K. S. Yoon, S. Lee, and J. Na, "Bi-static low-frequency reverberation model in shallow water" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **22**, 472-481 (2003).
  10. T. Oh, H. La, J. Na, and C. Park, "Mid-frequency bistatic reverberation model" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **25**, 389-394 (2006).
  11. S. Kim, W. Lee, S. K. You, J. W. Choi, W. Kim, J. S. Park, and K. J. Park, "High-frequency reverberation simulation of high-speed moving source in range-independent ocean environment" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **32**, 104-115 (2013).
  12. S. Oh, S. Cho, D. Kang, and K. Park, "Low-frequency normal mode reverberation model" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **34**, 184-191 (2015).
  13. J. Park, Y. Choo, K. Lee, and W. Seong, "Long range incoherent seafloor reverberation model based on coupled normal mode method" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **35**, 243-252 (2016).
  14. Y. Choo, W. Seong, I. Yang, and W. Oh, "Mid frequency band reverberation model development using ray theory and comparison with experimental data" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **28**, 740-754 (2009).
  15. J. W. Choi and P. H. Dahl, "Measurement and simulation of the channel intensity impulse response for a site in the east China Sea," *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 2677-2685 (2006).
  16. H. Cox, "Fundamentals of bistatic active sonar," *Underwater Acoustic Data Processing*, edited by Y.T. Chan (Springer, Netherlands, 1989).
  17. R. E. Francois and G. R. Garrison, "Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption," *J. Acoust. Soc. Am.* **72**, 1879-1890 (1982).
  18. F. Jensen, W. Kuperman, M. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics* (American Institute of Physics, New York, 1993), pp. 40-46.
  19. APL-UW, "APL-UW High-frequency ocean environmental acoustic models handbook," APL-UW TR 9407, AEAS 9501, Appl. Physics Lab., University of Washington, Tech. Rep., (1997).
  20. H. La and J. W. Choi, "8-kHz bottom backscattering measurements at low grazing angles in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* **127**, 160-165 (2010).
  21. Y. G. Yoon, C. Lee, J. W. Choi, S. Chom S. Oh, and S. K. Jung, "Measurements of mid-frequency bottom loss in shallow water of the yellow sea" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **34**, 423-431 (2015).

## 저자 약력

### ▶ 오 래 근 (Raegun Oh)



2013년 2월: 한양대학교 해양환경과학과  
학사  
2014년 9월 ~ 현재: 한양대학교 석·박사  
통합과정

### ▶ 김 선 호 (Sunhyo Kim)



2009년 2월: 한양대학교 지구해양과학과  
학사  
2011년 2월: 한양대학교 해양환경과학과  
석사  
2016년 8월: 한양대학교 해양융합과학과  
박사  
2016년 10월 ~ 현재: 한양대학교 박사 후  
연구원

### ▶ 손 수 옥 (Su-Uk Son)



2008년 2월: 한양대학교 지구해양과학과  
학사  
2010년 2월: 한양대학교 해양환경과학과  
석사  
2015년 8월: 한양대학교 해양융합과학과  
박사  
2016년 9월: 한양대학교 박사 후 연구원  
2016년 10월 ~ 현재: 국방과학연구소

## ▶ 최 지 웅 (Jee Woong Choi)



1996년 2월: 한양대학교 지구해양과학과  
학사  
1998년 2월: 한양대학교 지구해양과학과  
석사  
2002년 8월: 한양대학교 지구해양과학과  
박사  
2002년 11월 ~ 2007년 8월: Applied Physics  
Lab., Univ. of Washington, USA, Research  
Associate  
2007년 9월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합  
공학과 교수

## ▶ 박 정 수 (Joung-Soo Park)



1988년 2월: 한양대학교 지구해양과학과  
학사  
1990년 2월: 한양대학교 지구해양과학과  
석사  
2006년 8월: 한국해양대학교 해양개발공  
학과 박사  
1990년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소

## ▶ 신 창 홍 (Changhong Shin)



2000년 8월: 영남대학교 전기전자공학과  
학사  
2002년 8월: 경북대학교 전자공학과 석사  
2004년 8월: 경북대학교 전자공학과 박사  
수료  
2011년 8월 ~ 현재: LIG넥스원 선임연구원

## ▶ 안 명 환 (Myonghwan Ahn)



1998년 2월: 성균관대학교 제어계측공학  
과 학사  
2012년 2월: 연세대학교 전기전자공학과  
석사  
2000년 ~ 현재: LIG넥스원

## ▶ 이 범 직 (Bum Jik Lee)



1993년 2월: 해군사관학교 기계공학과  
학사  
2000년 2월: 연세대학교 전기전자공학과  
석사  
2004년 2월: 연세대학교 전기전자공학과  
박사  
2013년 ~ 현재: 대우조선해양