

# 거리독립 해양환경에서 고속이동 음원의 고주파 잔향음 신호모의

## High-frequency Reverberation Simulation of High-speed Moving Source in Range-independent Ocean Environment

김선호, 이원병\*, 유승기\*\*, 최지웅†, 김우식\*\*\*, 박정수\*\*\*, 박경주\*\*\*\*

(Sunhyo Kim, Wonbyoung Lee\*, Seung-ki You\*\*, Jee Woong Choi, Wooshik Kim\*\*\*,  
Joung Soo Park\*\*\*, and Kyoung Ju Park\*\*\*\*)

한양대학교 해양융합과학과 해양음향연구소, \*해군해양전술정보단, \*\*LIG 넥스원(주) M&S 연구센터,  
\*\*\*국방과학연구소 \*\*\*\*해군사관학교

(접수일자: 2012년 8월 23일; 수정일자: 2012년 10월 16일; 채택일자: 2012년 11월 16일)

**초 록:** 천해 환경에서 고주파 능동소나를 운용할 경우 각 경계면에서의 잔향음 및 도플러 효과는 소나 운용에 제한요소로 작용한다. 따라서 잔향음 제한 환경에서 소나 시스템을 운용하기 위해서는 그 환경 조건에서 발생하는 잔향음 준위를 예측하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 거리 독립 환경에서 고속으로 이동하는 음원에서 수신되는 잔향음 신호를 모의할 수 있는 고주파 잔향음 모델을 제안한다. 본 모델에서는 음선 이론과 음선 송신각 최적화 방법을 이용하여 음원에서 각 경계면까지의 고유음선 정보를 계산하고, 이동하는 음원에 의해 변화된 음원 수신 위치는 음속 그리고 음원의 방향 및 속도를 고려한 산란경로 탐색 알고리즘에 의하여 계산된다. 또한 해수면 및 해저면에서의 산란 효과는 APL-UW 산란 모델을 적용하여 고려한다. 본 논문에서 제안한 잔향음 모델은 2010년 8월 측정된 실험과 비교 검증된다. 본 논문에서 제안된 잔향음 모델은 잔향음 신호의 통계적 특성을 잘 반영하도록 개발되었다.

**핵심용어:** 잔향음, 산란경로 탐색 알고리즘, 시간영역 신호모의, 산란신호의 통계적 특성

**ABSTRACT:** In a shallow water waveguide, reverberation signals and their Doppler effects form the primary limitation on sonar system performance. Therefore, in the reverberation-limited environment, it is necessary to estimate the reverberation level to be encountered under the conditions in which the sonar system is operated. In this paper, high-frequency reverberation model capable of simulating the reverberation signals received by a high-speed moving source in a range independent waveguide is suggested. In this model, eigenray information from the source to each boundary is calculated using the ray-based approach and the optimizing method for the launch angles. And the source receiving position changed by the moving source is found by a scattering path-finding algorithm, which considers the speed and direction of source and sound speed to find the path of source movement. The scattering effects from sea surface and bottom boundaries are considered by APL-UW scattering models. The model suggested in this paper is verified by a comparison to the measurements made in August 2010. Lastly, this model reflects well statistical properties of the reverberation signals.

**Key words:** Reverberation model, Scattering path-finding algorithm, Time series simulation, Statistical properties of scattered signals

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

## 1. 서 론

†Corresponding author: Jee Woong Choi (choijw@hanyang.ac.kr)  
Department of Marine Sciences and Convergent Technology,  
Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan,  
Kyeonggi-do 426-791, Republic of Korea  
(Tel: 82-31-400-5531, Fax: 82-31-406-6255)

음원에서 수중으로 송신된 음파는 불규칙한 경계면과 체적 산란체 등에 의해 산란된 후 수신되어 잔향음 신호를 형성한다.

향음을 형성한다. 특히 천해에서는 심해에 비해 경계면의 영향이 크기 때문에 잔향음 제한 환경이 우세하게 되며, 이러한 환경에서 능동소나 운용 시 잔향음 신호는 탐지거리 예측에 제한요소로 작용한다. 이러한 잔향음 특성을 파악하고 이를 예측하기 위한 다양한 연구가 국내외적으로 진행되어 왔다.<sup>[1-8]</sup> 국외의 경우 음선이론을 기반으로 한 대표적 잔향음 모델로는 미해군 표준모델인 CASS(Comprehensive Acoustic System Simulation)를 들 수 있다.<sup>[1,2]</sup> 이밖에 여러 잔향음 모델들<sup>[3,4]</sup>이 개발되었지만 군사적인 목적 등으로 대부분 소스가 공개 되어 있지 않은 상태이고 사용이 제한적이다. 국내의 경우 국외의 잔향음 연구에 비해 뒤늦게 연구가 시작되었지만 국방과학연구소 지원으로 여러 연구들이 수행되어 왔다. 최 등<sup>[5]</sup>이 고주파 산란모델을 적용한 잔향음 모델을 개발하였고, 오 등<sup>[6]</sup>이 거리독립 환경에서 양상태 잔향음 알고리즘을 제안하였다. 또한 추 등<sup>[7]</sup>이 거리중속 환경에서 적용 가능한 중/주파수 대역 잔향음 모델을 개발하였고 김 등<sup>[8]</sup>이 음선 이론에 근거한 음파 전달 모델인 BELLHOP을 이용하여 잔향음 연산 기능을 추가하는 연구를 수행하였다.

이와 같이 여러 잔향음 모델들이 연구, 보고 되고 있지만 모두 고정형 음원에서의 잔향음만을 고려하였고, 이동하는 음원에서의 잔향음을 모의하는 모델은 현재까지 보고되지 않았다. 기존 모델은 음원과 수신기 위치가 고정이기 때문에 음원 이동에 따른 음 전달 경로 변화를 고려하기 어렵다. 양상태 잔향음의 경우 수신기 위치를 변화시키면서 경계면에서의 산란 경로를 반복적으로 추적하면 고속이동 음원에서 잔향음 계산이 가능하지만 연산시간의 대폭 증가로 인하여 시뮬레이션 효율이 급속히 낮아진다. 따라서 이동 음원에서의 잔향음 특성 분석이 가능하고 신속한 연산이 가능한 잔향음 모델의 개발이 필요하다. 고속으로 이동하는 음원에서의 잔향음 계산 방법은 정지상태의 음원에서의 알고리즘과는 차이가 있다. 예를 들어 이동하는 음원에서의 잔향음 신호를 준 실시간으로 모의하기 위해서는 이동하는 음원에 의해 시간에 따라 변화되는 산란경로를 계산하기 위한 알고리즘이 필요하며, 이동 음원에서의 도플러 효과가 반영된 잔향음 모의가 필요하다.

본 연구에서는 천해 거리독립 해양환경에서 고속으로 이동하는 음원의 고주파 잔향음 준위를 신속하게 계산하는 알고리즘을 적용하였고 경계면 산란 신호의 통계적 특성을 고려한 시간영역 신호를 모의하였다. 잔향음 계산은 먼저 음선이론을 이용하여 각 송신각에 대해 음선추적을 수행하여 각 경계면에 도달하는 음선 정보를 계산한다. 수신 위치 및 전달시간 등 경계면에서 이동하는 음원까지의 산란경로의 음선 정보는 음원의 속도, 방향 그리고 음속을 이용하여 계산하였다. 또한 고속으로 이동하는 음원에서 신속한 잔향음 계산을 위해 송신 경로와 수신 경로가 유사한 형태를 가지는 경로를 선정하는 방법을 이용하여 음선 정보를 확장 하였다. 각 경계면에 대한 반사와 산란은 레일리 반사모델 및 고주파 산란모델을 적용하여 각각의 거리구간에서 산란되어 되돌아오는 음압강도를 계산한 후 이를 같은 시간 구간을 갖는 음압끼리 모은 후 음압강도의 합을 수행하여 시간에 따른 음압강도 임펄스 응답을 계산하였다. 끝으로 산란 신호의 통계적 특성을 적용하여 시간영역에서 잔향음 신호를 모의하였다. 개발된 모델은 2010년 8월 남해 통영 연안에서 실시된 잔향음 해상실험 결과와 비교 분석하여 검증하였다.

본 논문의 2장에서는 잔향음 계산 알고리즘, 음원 이동 시 수신위치를 탐색하는 알고리즘, 음원 송신각 최적화 알고리즘에 대하여 설명한다. 3장에서는 잔향음 해상 실험결과와 모의된 잔향음 결과를 비교 분석하였으며, 4장에서는 이동 음원에서 산란 신호의 통계적 특성이 고려된 시간영역 잔향음 신호모의에 대해 기술한다.

## II. 잔향음 계산 알고리즘

### 2.1 음선추적 알고리즘

음선추적은 음속이 변하는 매질 내에서 깊이가 변하여도, 입사각과 음속의 비는 일정한 값을 갖게 되는 스넬의 법칙<sup>[9,10]</sup>을 이용하였다.

$$\frac{\cos\theta_0}{c_0} = \frac{\cos\theta_1}{c_1} = \dots = \frac{\cos\theta_n}{c_n} = \alpha \quad (1)$$

여기서  $\theta_n$ 은  $n$ 번째 경계면에서 음의 입사각이고,  $c_n$ 은  $n$ 번째 매질에서의 음속이다.  $\alpha$ 는 상수로 거리 독립 환경에서 불변의 값을 가진다. 음원에서 경계면까지의 음파전달을 모의하기 위해 본 모델에서는 연산시간이 빠르고, 고주파에 적합한 음선이론을 이용한다. 음속이 선형적인 기울기로 변하는 환경에서 초기 송신각이  $\theta_0$ 인 음원으로부터 각 경계면까지의 음선추적은 식(2)로부터 계산할 수 있다.<sup>[9,10]</sup>

$$\begin{aligned} x_{n+1} - x_n &= \frac{1}{ag} [\sin\theta_n - \sin\theta_{n+1}], \\ t_{n+1} - t_n &= -\frac{1}{g} \ln \left\{ \frac{\cos\theta_n (1 + \sin\theta_{n+1})}{\cos\theta_{n+1} (1 + \sin\theta_n)} \right\}, \\ s_{n+1} - s_n &= \frac{1}{ag(\theta_n + \theta_{n+1})}. \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서  $g$ 는 음속 기울기,  $x_n$ ,  $t_n$ ,  $s_n$ 는  $n$ 번째 층에서 음선의 수평거리, 전달시간 및 실제전달거리를 나타낸다. 음원과 경계면 사이를 통과하는 전체 매질 층에 대해 식(2)에서 계산된 값들을 적분하여 음선이 실제 이동한 수평거리, 도달시간 및 전달거리 등 음선 정보를 계산할 수 있다.

Fig 1은 음선추적 알고리즘을 이용하여 계산된 음속구조에 따른 음선추적 결과이다. 모의환경으로는 수심 50m, 음원수심은 10m, 최대 수평거리 3,000m, 송신각  $-10 \sim 10^\circ$ 였으며 이 때 음선 간격은  $0.5^\circ$ 를 사용하였다. Fig 1 (a)에서는 깊이에 따라 동일한 음속

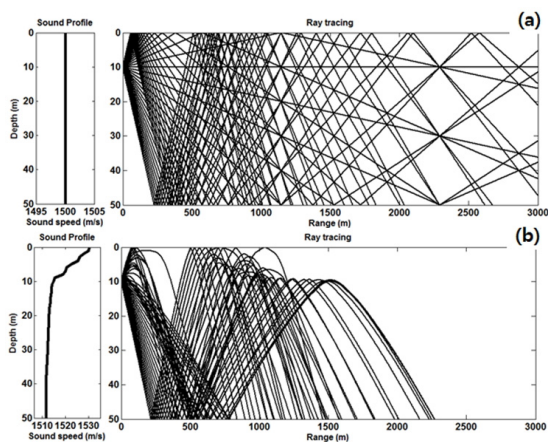


Fig. 1. Ray tracing outputs for (a) constant sound speed profile and (b) negative sound speed profile.

인 등속구조의 환경에서의 음선추적 결과를 보여준다. 음원에서 송출된 음선들이 직진하여 전반적으로 전수심에 대해 음파가 골고루 전파되고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 Fig 1(b)는 음의 기울기를 갖는 여름철 음속구조에서의 음선추적 결과로 해수면 부근에서의 높은 음속에 의해 해저면 방향으로의 음파 굴절이 나타나서 음파전달 양상 및 전달거리에서 Fig 1(a)와 많은 차이가 발생함을 알 수 있다.

각 음선 경로들에 대한 전달손실을 계산하기 위하여 확장손실은 에너지 보존법칙을 이용하여 경계면 위치에서 두 음선 사이의 면적 비를 통해 계산 가능하다.<sup>[9,10]</sup>

$$I(r) = I_0 \frac{r_0^2 \cos\theta_0}{r \sin\theta} \left| \frac{d\theta_0}{dr} \right|. \quad (3)$$

여기서  $I(r)$ 는 임의의 위치에서의 음압 세기,  $r_0$ 는 기준거리 (일반적으로 1 m),  $r$ 은 음원에서부터 임의의 위치까지의 수평거리,  $\theta$ 는 도달각,  $d\theta_0$ 는 초기 두 음선 사이의 각도 간격,  $dr$ 은 임의의 위치 전후에 존재하는 음선들의 수평거리이다. 정확한 전달손실을 고려하기 위해 해저면 반사 손실과 해수 매질에 의한 감쇠의 영향을 포함하여 전달손실을 계산하였으며, 해저면 반사손실 모델로는 Rayleigh 반사계수 모델<sup>[11]</sup>이, 감쇠손실 모델로는 Francois-garrison 모델<sup>[12]</sup>이 사용되었다.

## 2.2 잔향음 준위 계산 알고리즘

음원으로부터 송신된 음이 경계면(해수면, 해저면)에 도달할 때의 음선 정보를 이용하여 경계면으로부터 산란 되어 음원으로 되돌아오는 음선 정보 및 경계면 산란강도 그리고 산란 단면적을 도출하였고 소나방정식인 식(4)에 대입하여 잔향음 준위를 계산하였다.

$$\begin{aligned} RL &= SL - TL_1 - TL_2 + SS_{S,B} \\ &+ 10 \log A + BP_t + BP_r. \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $RL$ 은 잔향음 준위(dB re  $1 \mu\text{Pa}$ ),  $SL$ 은 음원

준위(dB re 1 μPa at 1 m),  $TL_1$ 은 음원에서 경계면까지의 전달손실(dB re 1 m),  $TL_2$ 는 경계면에서 음원까지의 전달손실(dB re 1 m)이다.  $SS_{SB}$ 는 경계면에서의 단위면적당 산란강도(dB re 1 m<sup>2</sup>)이고 여기서 아래첨자  $S$ 와  $B$ 는 각각 해수면과 해저면을 의미한다. 또한  $A$ 는 산란단면적(m<sup>2</sup>),  $BP_t$ 와  $BP_r$ 은 각각 송·수신 빔패턴을 나타낸다.<sup>[13,14]</sup>

각 경계면에서의 산란은 고주파 경계면 산란의 대표적 모델인 이론식 기반의 Kirchhoff 근사법과 섭동이론을 적용하여, 각 경계면에서 입사각과 산란각에 대한 산란강도를 적용하였다.<sup>[15]</sup> 산란단면적은 무지향성 센서에 의한 단면적인 경우, 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며, 지향성 센서인 경우는 식(5)에 빔패턴 함수를 곱해주어야 한다.

$$A = \frac{1}{2} \pi \cos^2 \theta c_w^2 T \tau. \quad (5)$$

여기서  $\theta$ 는 수평입사각,  $c_w$ 는 경계면에서의 수층 음속,  $T$ 는 전달시간, 그리고  $\tau$ 는 신호 길이를 말한다. 본 연구에서는 전체 잔향음준위에서 체적 잔향음은 경계면 잔향음에 비해 상대적으로 미약하고 시·공간적 변동성이 크기 때문에 빠른 잔향음 모의를 위해서 체적 산란에 의한 영향은 무시하였다.

고속으로 이동하는 음원에서 잔향음 신호를 모의하기 위해서는 잔향음 알고리즘을 단순화하여 신속한 계산을 위한 방법이 요구된다. 일반적인 잔향음 계산 알고리즘은 일정 거리 간격으로 나누어진 경계면의 각각의 부분에 대한 고유음선 정보들을 저장하고 이들의 다중 왕복경로를 모두 고려하여 잔향음을 계산하는 방법을 사용한다. 이 방법은 복잡한 환경에서 비교적 정확한 잔향음 준위를 계산할 수 있지만 시간 소모가 많기 때문에 단시간 내에 계산이 요구되는 고속이동 음원에 의한 잔향음 신호모의에는 적합하지 않다. 만약 음원 및 수신기가 고정 상태라면 음원에서 경계면까지의 송신경로는 경계면에서 음원으로의 산란 경로와 동일한 음선 정보를 가진다는 가역정리가 성립이 되며 빠른 계산이 가능하지만 본 잔향음 모델에서는 음원 자체가 이동을 하기 때문에 송신 경로와 수신 경로 사이에 가역정리가 성

립이 되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 음원이 좁은 빔 폭을 가지고 고속으로 이동한다는 가정하에 음원에서 경계면까지의 송신 경로와 경계면에서 위치 이동한 음원까지의 수신 경로가 동일한 전달 형태를 가지는 음선 경로만을 고려하였다. 이에 대한 자세한 설명은 2.3절에서 다루어진다.

Fig. 2는 단순 환경(음속 1500 m/s, 수심 50 m, 음원 수심 25 m, 주파수 10 kHz, 수평거리 1 km, 잔향음 계산 시간 1 s, 해저면 저질성분 8 ϕ, 송신각 범위 -10°~10°)에서 다중 왕복경로를 모두 고려하여 계산하는 일반적인 잔향음 알고리즘과 동일한 전달형태만을 고려하여 계산한 해저면 잔향음 모의 결과 비교이다. 해저면에 의한 직접경로만이 존재하는 0.58 초까지의 잔향음 준위에는 차이가 존재하지 않고 다중 왕복경로에 의한 잔향음이 수신되는 0.58 초 이후부터 약 2 dB이내의 차이를 가진다. 이러한 차이는 신속한 잔향음 계산을 목적으로 판단할 경우 시공간적인 환경변화와 시스템 불안정성에 의한 잔향음 수신 오차와 비교하여 볼 때 중요 오차가 아니라는 가정하에 본 잔향음 모델에서는 동일한 전달 형태만을 고려하였다.

본 잔향음 모델의 또 다른 특징은 신속한 잔향음 계산을 위해 단 한번의 음선추적 수행을 통해 경계면에서의 고유음선 정보가 저장되고 이를 이용하여 빠르게 잔향음을 계산한다는 것이다. 음선 추적 수행 시 음원 송신각을 등간격으로 분할하여 사용할 경우 근거리에서는 상대적으로 많은 경계면 고유음선 정보를 얻을 수 있지만 거리가 증가함에 따라 각 음선 간 수평거리가 증가하기 때문에 장거리에 위치하는 경계면의 고유음선 정보를 모두 얻기에는 어려움이 따른다. 이로 인해 모의 결과상에 잔향음 준위

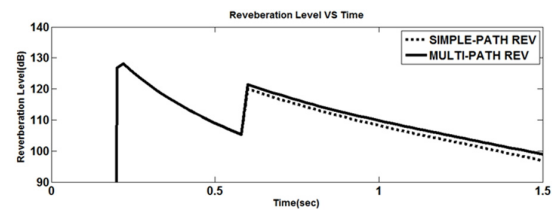


Fig. 2. Comparison of reverberation level predicted using only the same types of ray path and that predicted using every multipaths.

가 존재하지 않는 구간이 만들어 질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위해 음선추적에서 송신되는 음선 간격을 가우시안 분포 함수를 이용하여 원거리에서도 충분한 경계면 음선 정보를 얻을 수 있도록 음선 간격을 최적화 시키는 방법을 사용하였다. 이를 위해 우선 등간격으로 고려된 음원 송신각 행렬 ( $\theta_u$ )을 송신 중심각( $\theta_c$ , 일반적으로 음원 지향각)만큼 이동시켜서 각도 변환된 송신각 행렬의 중심각이 0도가 되도록 한 후 이를  $\theta_s$ 라 둔다. 그런 다음 아래의 식을 통하여 송신각을 가우시안 분포를 갖는 각도 간격으로 변화시킨다.

$$\theta_g = \left| \exp \left[ -\frac{\theta_s^2}{2\sigma^2} \right] - 1 \right| \cdot \max(\theta_s) , \quad (6)$$

if  $\theta_s < 0, \theta_g = -\theta_g$ .

마지막으로 각도 간격이 재분배된 송신각 행렬을 다시  $\theta_c$  만큼 위치 보정 시킨다. 위 식에서  $\sigma$ 는 고려하고자 하는 송신각 범폭의 6분의 1이나 그 보다 약간 작은 수치로 설정할 것을 추천한다. Fig. 3은 등간격으로 분할된 송신각과 가우시안 간격 분포를 가지는 송신각을 이용하여 음선 추적을 실시한 결과 비교를 보여준다. 가우시안 분포는 등간격을 가지는 송신각보다 수평방향의 송신각 범위에서 많은 음선이 분포하므로 원거리에 위치하는 경계면의 고유음선 정보를 많이 얻을 수 있다. 수평축인 0°를 중심으로  $\pm 10^\circ$

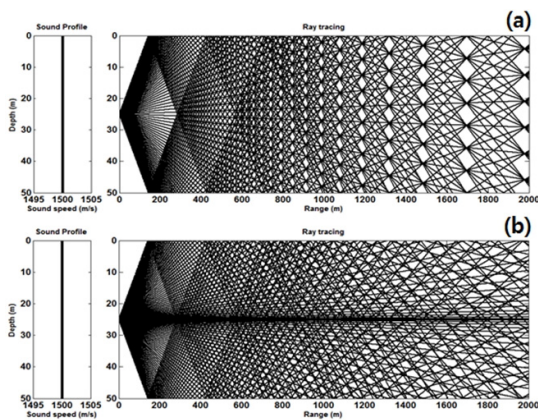


Fig. 3. (a) raytracing using iso-launch angle interval (0.25°), (b) raytracing using an optimizing method for launch angle interval.

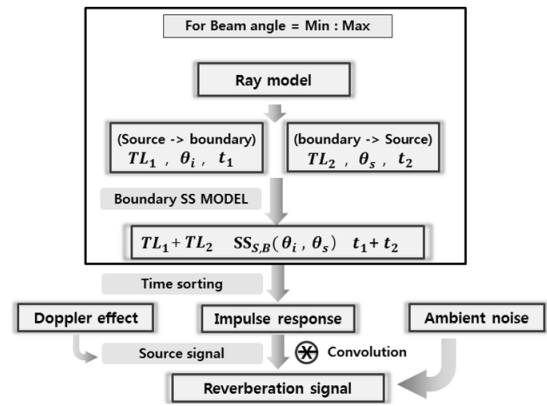


Fig. 4. Flow chart for reverberation simulation.

의 송신각을 동일한 간격(0.25°)으로 분포시킨 음선 추적 결과 (Fig. 3(a))에서는 거리가 증가함에 따라 각 음선 간의 수평거리가 증가하므로 고유음선이 존재하지 않는 경계면 영역들이 발생하는 것을 볼 수 있다. 하지만 식(6)에 의해서 간격 조정된 송신각을 이용한 음선 추적 결과(Fig. 3(b))에서는 거리가 증가할 수록(즉, 수평방향에 가까워 질수록) 음선 간격이 비교적 좁아지기 때문에 원거리 경계면 영역에서도 충분한 고유음선 정보를 얻을 수 있다.

Fig. 4는 잔향음을 모의하기 위한 흐름도이다. 잔향음을 모의하기 위해 먼저 음선 최적화 방법을 이용하여 송신각에 대해 음선추적을 수행하고 각 경계면에 도달하는 음선 정보를 계산한다. 잔향음 시간 간격 내에 들어오는 음선을 선별하고 해당하는 음선 정보와 식(4)을 이용하여 잔향음 준위를 계산한다. 마지막으로 산란되어 수신된 수신강도들을 시간 순으로 나열하여 음압강도 임펄스응답을 모의한다. 이때 같은 샘플링 시간에 들어오는 음선들은 음압강도 합산을 실시하여 하나의 임펄스 응답으로 변환시킨다. 마지막 단계로 모의된 임펄스 응답은 음원신호와 콘볼루션시킨 후 시간영역에서의 잔향음 신호를 모의한다.

### 2.3 음원의 고속이동 알고리즘

본 모델은 고정음원에서의 잔향음을 모의하는 기존 잔향음 모델들과는 달리 음원이 수중에서 고속으로 이동하는 경우에서도 잔향음을 모의할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 따라서 기존 잔향음 모델들과

는 다른 알고리즘이 요구된다. 음원이 일정속도로 이동할 경우 음원에서 송신된 음파가 경계면에 산란되어 되돌아오는 동안 음원이 일정 방향 및 속도로 이동하기 때문에 음파 수신 위치가 달라진다. 예를 들어 고속으로 이동하는 음원에서 송신된 음파는 Fig. 5의 ①, ②, ③, ④, ⑤번의 위치에서 해수면과 해저면에 의한 반사 및 산란을 거친 후 다양한 전파 경로를 통해 수신기에 수신된다. 이동하는 음원에서 송신된 음파는 해수면(S)에서 산란되어 ①번 위치에서 수신되고 ②번 위치에서 수신되는 산란신호는 해수면(S)-해저면(B)-해수면(S) 경로를 거쳐 수신된다. 음원의 이동시간이 증가함에 따라 멀리 송신된 음파 경로와 수신되는 음파경로가 ⑤번과 같이 확연히 달라지는 것을 알 수 있다. 따라서 경계면에서 산란된 음파가 수신위치까지 전달 시 고려되는 산란각, 전달 손실, 전달 시간 등의 음선 정보가 필요하게 된다. 본 모델에서는 빠른 잔향음 계산을 위하여 다중 반사된 후 경계면에서 산란되어 다시 다중 반사되는 경로를 통해 수신되는 신호는 같은 전달 시간을 가지면서도 반사 없이 경계면에 직접 전파된 후 산란되어 경계면에 의한 간섭현상 없이 되돌아오는 신호에 비해 그 세기가 무시 가능하다는 가정하에 왕복 경로 기준으로 해수면과 해저면 반사를 각각 최대 4 회까지만 고려하였다.

Fig. 6은 음원이 고속으로 이동할 경우 목표 산란 위치( $t_0, R_0$ )에서 이동하는 음원으로 산란되는 경로를 탐색하기 위한 알고리즘 모식도이다. 산란경로

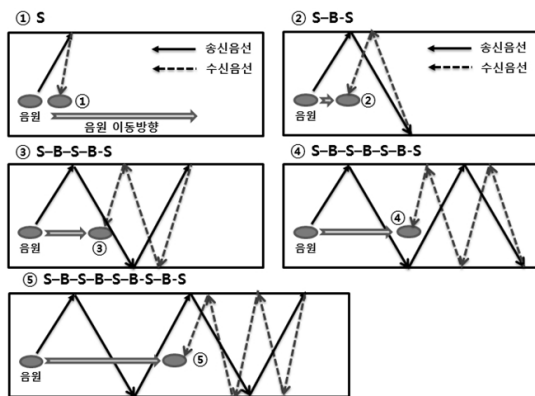


Fig. 5. Change of transmitting and receiving ray paths due to the movement of source.

탐색 알고리즘은 고속으로 이동하는 음원은 수평방향으로 직선운동을 한다는 가정하에 적용할 수 있다. 이러한 가정은 일반적으로 수 킬로미터 이상을 고려하는 음파 전달거리에 비해 수백미터 이하의 고속 이동음원의 운용수심을 고려할 때 타당한 것으로 판단할 수 있다. 음 전달 경로 탐색 알고리즘은 경계면에 도달하는 목표 송신 경로의 수평거리( $R_0$ )와 각 송신경로( $R_n$ )간 사이 거리( $\Delta R_n$ )가 음원이 수평적으로 이동한 거리( $r_n$ )와 같아질 때의 송신 경로를 탐색하여 계산된다. 음원이 수평적으로 이동한 거리는 송신경로의 왕복 시간( $T_n$ )과 음원 속도( $V$ )의 곱으로 계산할 수 있다. 먼저 목표 산란 위치( $t_0, R_0$ )와 첫 번째 산란 위치( $t_1, R_1$ )간 수평거리( $\Delta R_1$ )는 두 경로의 왕복 전달 시간과 음원 속도의 곱으로 계산되는 음원 이동거리( $r_1$ ) 보다 매우 크기 때문에 산란 경로에서 배제시킨다. 다음 목표 송신경로와 두 번째 송신경로( $t_2, R_2$ )와 비교를 해보면  $\Delta R_2$ 가  $r_2$ 보다 크지만 세 번째 송신경로( $t_3, R_3$ )와 비교에서는  $\Delta R_3$ 이  $r_3$ 보다 작기 때문에 두 번째와 세 번째 송신 경로 사이에 산란경로가 존재한다는 것을 유추할 수 있다. 따라서 산란 경로를 계산하기 위하여 두 번째와 세 번째 송신경로의 비례 값을 계산한 후 음파전달 방향만을 역전시키면  $\Delta R_n$ 와  $r_n$ 이 같아질 때의 산란 경로를 계산할 수 있다. 이와 같은 방법을 이용하여 산란위치( $t_0, R_0$ )로부터 음원 수신위치까지의 음파전달 손실, 전달 시간, 산란각 등의 고유음선 정보를 계산한다.

고속으로 이동하는 음원과 정지 음원에서의 잔향음 차이는 경계면에서 음원으로 되돌아오는 산란 경

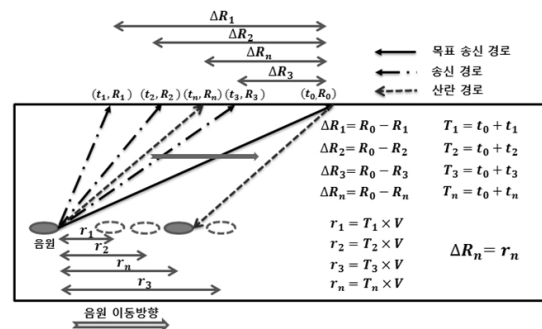


Fig. 6. Receiving position calculation of the moving source.

로가 달라짐에 따른 전달 손실 및 산란강도의 차이와 도플러 효과에 의해 발생한다. 식(4)에서 음원이 이동할 경우 정지상태에 비해 잔향음 준위에 영향을 주는 요인으로는  $TL_2$ 와  $SS_{S,B}$ ,  $A$ ,  $BP_r$ 가 있다. 우선 음파의 전달 방향과 동일하게 이동하는 음원에서 송신된 음파가 경계면에서 산란되어 음원으로 되돌아올 경우 음파전달 거리는 송신 경로에 비해 짧아지게 되고 경계면에서의 산란각은 입사각보다 약간 증가하게 된다. 또한 수신 경로에서의 경계면 반사각은 송신 경로에서의 경계면 반사각보다 증가하게 된다. 이러한 영향들로 인해 각각의 파라미터들은 잔향음 준위에 이득을 주는 요인과 손실을 주는 요인으로 구분할 수 있다. 먼저 경계면 반사손실을 배제한 전달손실은 송신 경로에 비해 짧아진 산란 경로에 의해 잔향음 준위에 이득을 주나 경계면 반사손실은 높은 수평각으로 인하여 그 손실이 증가하게 된다. 또한 경계면 산란강도는 증가한 산란각으로 인하여 약간 증가하지만 그에 따른 산란 단면적 감소는 잔향음 준위의 감소를 가져온다. 위에서 언급한 여러 환경 파라미터들에 의해 잔향음 준위가 결정되지만 일반적으로 잔향음 준위에 우세한 영향을 끼치는 요인으로는 경계면 반사손실을 들 수 있다. 산란강도 및 산란 단면적의 증감은 산란 각에 따라 상호 보완을 해 주는 경향이 있고, 전달손실의 경우 음속(일반적으로 1500 m/s)에 비하여 음원 속도가 비교적 작기 때문에 대부분의 경우 송/수신 시의 전달 손실이 1 dB 미만의 차이를 보인다. 하지만 경계면 반사손실의 경우 거리가 증가하면서 경계면 반사횟수가 증가하게 되고, 이동성 음원에서의 경계면 반사각이 고정형 음원에 비해 증가함에 따라 반사손실 또한 증가하게 된다.

음원 속도에 따른 잔향음 준위의 변화를 시뮬레이

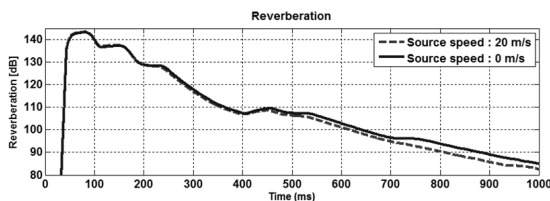


Fig. 7. Comparison of simulated reverberation levels for different source speeds.

션을 통하여 확인하기 위해 고정음원인 경우와 음원이 일정 속도(20 m/s)로 이동할 경우 잔향음 준위를 단순 환경(음속 1500 m/s, 수심 38 m, 음원 수심 10 m, 풍속 5 m/s, 해저저질 4  $\phi$ , 수평거리 1000 m, 주파수 30 kHz, 신호 길이 60 ms, 음원 송신각 범위  $-20^\circ \sim 20^\circ$ )에서 비교하였다(Fig. 7). 약 500 ms 이후부터 정지 음원에서의 잔향음 준위에 비해 20 m/s로 이동하고 있는 음원에서의 잔향음 준위가 약 2 dB 이상 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 차이를 발생 시키는 원인 중 가장 우세한 요인은 앞에서 언급한 바와 같이 거리가 증가함에 따라 경계면 다중 반사 경로를 통하여 수신된 음선 수가 증가하게 되고 이에 따라 반사손실의 차이가 증가함에 기인한다.

## 2.4 도플러 효과

고속으로 이동하는 음원에서 음파가 송신된 후 경계면에서 산란된 음파가 수신될 때 음원의 송신각 및 산란각 그리고 음원 속도에 의하여 도플러 효과가 발생하며 음원에서 송신한 신호에 비해 주파수 변이된 잔향음 신호를 수신하게 된다. 음파 전달 방향으로 이동하는 음원은 정지상태의 경계면에 접근하므로 주파수 증가가 발생하고 서로 다른 음파 전달 경로마다 송신각과 수신각이 다르기 때문에 같은 시간에 들어오는 음선 일지라도 서로 다른 주파수 변이 값을 갖는다. 본 잔향음 모델에서는 해수면의 경우에도 시간에 따른 변동성이 무시 가능하다는 가정하에 아래의 식을 이용하여 도플러 변이된 주파수를 모의하였다.<sup>[9]</sup>

$$f_s = \frac{f_c (c_m + v \cos \theta_s)}{(c_m - v \cos \theta_r)} \quad (7)$$

여기서,  $f_s$ 는 변이된 주파수(Hz),  $f_c$ 는 송신 주파수(Hz),  $v$ 는 음원 이동 속도(m/s)이며,  $c_m$ 은 수층 음속으로 본 논문에서는 수층에 대한 평균 음속을 사용하였다.  $\theta_s$ 는 음원에서의 음파 송신각,  $\theta_r$ 는 경계면에서 산란된 음파가 이동하는 음원에 수신될 때의 도달각으로 전파 경로에 따라 각기 다른 값을 가지게 된다. 본 잔향음 모의 알고리즘에서

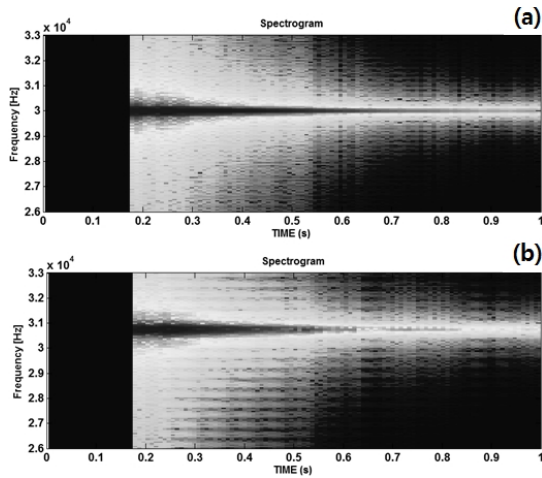


Fig. 8. Comparison of frequency spectrograms for (a) fixed source (0 m/s) and (b) moving source (20 m/s).

는 도플러 효과가 고려된 잔향음 신호를 모의하기 위하여 잔향음 채널 임펄스와 음원신호를 콘볼루션할 때 음원신호에 각 임펄스에 해당하는 도플러 변이가 고려된 음원 신호를 이용하여 시간영역 잔향음 신호를 모의하였다.

Fig 8은 음원이 정지상태인 경우와 20 m/s로 이동하는 경우 모의된 잔향음 신호의 스펙트로그램 비교이다. 모의 결과 음원이 20 m/s의 이동속도와 30 kHz의 송신 주파수를 가질 경우 약 0.74 kHz의 주파수 증가가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 원거리의 경계면에서 산란된 음파일수록 송신각과 도달각이 작아져서 단거리 음파에 비해 주파수 변이량이 증가하여야 하지만, 음원 속도에 비해 음속이 훨씬 크므로 시간에 따른 주파수 변이 차이를 스펙트로그램상에서 확인하기는 어렵다. 예를 들어 음원에서 수평거리 100 m와 1 km 떨어진 해수면에서 산란된 신호의 주파수 변이는 각각 0.62 kHz와 0.77 kHz이다.

### III. 잔향음 해상실험 및 모의 결과 비교

#### 3.1 잔향음 해상실험

잔향음 모델 결과를 검증하기 위한 잔향음 신호 측정은 2010년 8월에 통영에 위치한 한국해양과학기술원 통영해양생물자원연구보존센터 해상(34° 46' N, 128° 23' E)에서 실시되었다. 실험 해역은 평균 수심

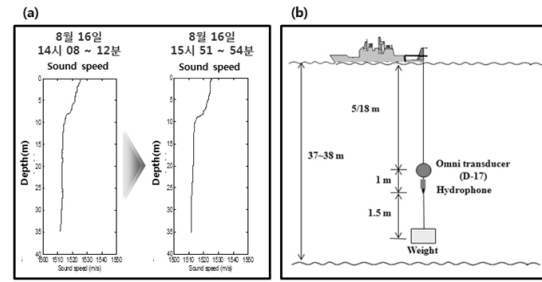


Fig. 9. (a) Sound speed profile measured by CTD, (b) experimental layout for measurements of reverberation.

37 m의 거리독립환경으로 그랩 샘플로부터 퇴적물 입도 분석을 실시한 결과, 미사질 점토에 해당하는 평균입도 8.0  $\phi$  ( $\phi = -\log_2(\text{입자직경})$ )로 분석되었다. 잔향음 실험 시 정확한 모델 입력값을 얻기 위해 CTD와 풍향풍속계를 이용하여 시간에 따른 음속구조 변화와 해상풍속을 주기적으로 측정하였다. 실험 기간 동안 일정한 음속구조를 나타냈으며(Fig. 9(a)), 평균 해상풍속 또한 2 m/s로 일정하였으므로 해양환경 요소들의 시간적인 변화를 무시한 거리 독립 해양환경을 가정하였다.

Fig 9(b)는 해상실험환경을 모식도이다. 송신기 하부 1 m 아래 수신기를 설치하여 단상태를 가정하였으며, 송신 신호로 1, 5, 10 ms의 신호 길이를 가지는 17 kHz 정현파 신호를 무지향성 음원(D-17, Neptune)을 이용하여 음원 수심 5 m와 18 m에서 100회씩 반복적으로 송수신하였다. 연구목적상 고속이동 음원에서 잔향음 실험이 수행되어야 하지만 실험여건상 이동음원에 대한 잔향음 신호 측정은 불가능하였기에 음원 및 수신기가 고정된 환경에서 잔향음 실험 신호와 잔향음 모델 신호를 비교 분석하였다.

#### 3.2 잔향음 실측값과 모의결과 비교

Fig 10은 음원 수심 5 m와 18 m에서 신호 길이 5 ms에 대해 모의한 잔향음 준위 결과와 실험을 통해 측정된(100 ping에 대한 음압강도 평균으로부터 계산된) 수신 잔향음 준위 비교이다. 음원 수심이 5 m인 경우 초기 잔향음 신호에는 해수면 잔향음 신호가 약 7 ms에서 우세하게 수신되고 뒤이어 약 43 m부터 해저면 잔향음 신호가 우세하게 수신되었다. 수심 18 m인 경우에는 해수면과 해저면 잔향음 신호가 거



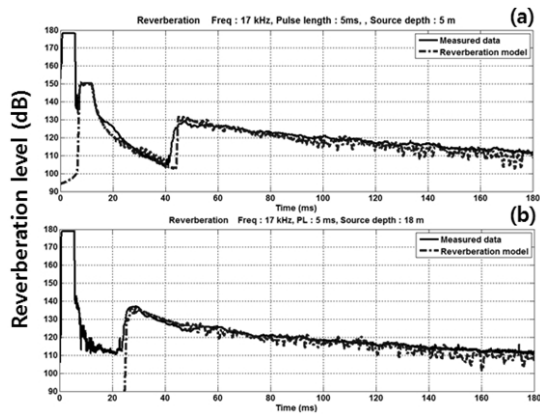


Fig. 10. Comparison of measured reverberation level simulation for (a) source depth 5 m, (b) 18 m. (frequency: 17 kHz, source level: 191.33 dB, pulse length: 5 ms, water depth: 37.5 m, wind speed: 2 m/s, sediment grain size:  $8 \phi$ ).

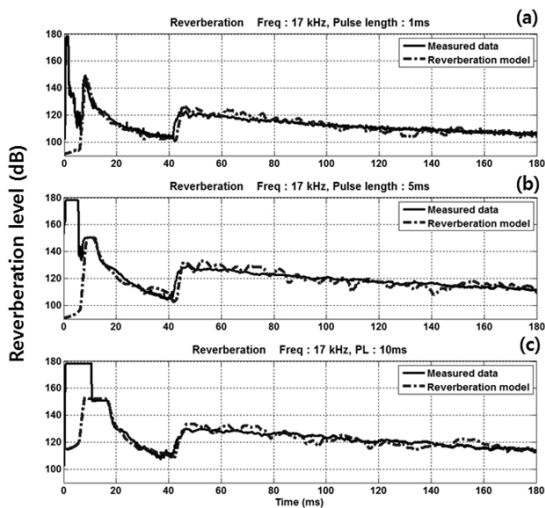


Fig. 11. Comparison of measured reverberation level and simulation for (a) pulse length of 1 ms, (b) 5 ms, (c) 10 ms. (frequency: 17 kHz, source level: 191.33 dB, pulse length: 5 ms, water depth: 37.5 m, wind speed: 2 m/s, sediment grain size:  $8 \phi$ ).

의 동시에 약 22 ms에서부터 수신되었다. 모의 잔향음 준위에서도 이러한 경향과 준위 값을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 실측신호 0-7 ms 부분은 송·수신기간분리 및 선박하부와 중량물에 의한 영향으로 모의 결과에서는 모의되지 않는 신호이다. 또한 음원 수심이 18 m인 경우 약 7 ms에서 22 ms 신호 사이에 해수면 및 해저면 산란 신호가 아닌 다른 (잡음) 신호가 존재 하는 것을 관측할 수 있는데, 이는 실험

시 발생하는 시스템 소음과 주변 소음의 영향으로 본 잔향음 모델에서는 고려하지 않는다.

Fig 11은 음원 수심을 5 m로 고정시킨 상태에서 송신 신호의 길이만 1, 5, 10 ms로 변경시켰을 경우 실측 잔향음 준위와 모의 결과의 비교이며 전반적으로 송신 신호의 길이가 증가하면 잔향음 준위도 증가하는 경향을 보인다. 송신 길이가 증가할수록 잔향음 준위가 증가하는 이유는 산란단면적을 계산하는 식으로부터 설명 가능하다.

$$\begin{aligned} 10\log(A) &= 10\log\left(\frac{1}{2}\pi\cos^2\theta c_w^2 T\tau\right) \\ &= 10\log\left(\frac{1}{2}\pi\cos^2\theta c_w^2 T\right) + 10\log(\tau). \end{aligned} \quad (8)$$

윗 식에 의하면 신호 길이는 산란단면적과 비례관계에 있으므로 신호 길이가 10배 증가하면 산란단면적이 10배 증가하게 되고 따라서 잔향음 준위가 10 증가함을 예측할 수 있으며, Fig 11의 실측된 잔향음 준위에서도 (a)-(c)의 경우를 비교하면 펄스길이에 대한 경향을 잘 보여주고 있다.

#### IV. 시간영역 잔향음 신호모의와 통계적 특성

송신각의 최적화 방법을 이용한 음선 추적 알고리즘, 고속으로 이동하는 음원에서 수신되는 산란 경로 추정 알고리즘 그리고 잔향음 계산 알고리즘을 통해 각 경계면에 대한 임펄스 응답을 계산하였고 여기에 임의의 거칠기를 가지게 되는 해수면 신호의 통계적 특성을 포함시켜 시간영역 신호모의 시 적용하였다. 경계면 산란신호는 중심극한정리에 의해 진폭은 레일리 분포를 나타내고, 음압강도는 지수 분포를 따르며, 한 핑에 대한 표준편차는 5.6 dB를 갖는 통계적 특성을 따르게 된다.<sup>[16]</sup> 이러한 산란 신호의 통계적 특성은 경계면 단/양상태 산란 실험실로부터 실험적으로 검증되었다.<sup>[17,18]</sup> 잔향음 모델에 위에서 언급한 산란 신호의 통계적 특성을 적용하기 위해, 잔향음 모델을 통해 계산된 시간영역에서의 임펄스 응답에 레일리 분포를 갖는 가중함수를 곱한

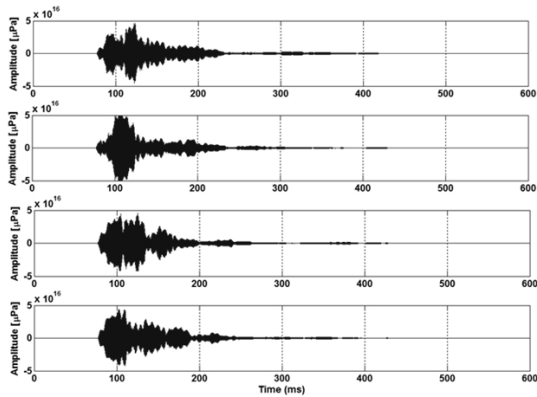


Fig. 12. Reverberation time series simulation results reflecting the statistical properties of reverberation signals.

후 각각의 임펄스 응답에 해당하는 주파수 변이된 음원 신호와의 콘볼루션을 수행하여 같은 해양환경 일지라도 모의 시마다 임의의 크기를 가지고 상호 독립적인 산란 신호를 생성하였다(Fig. 12). 모델링 환경으로는 수심 50 m, 음원 수심 10 m, 음원 속도 10 m/s, 신호 길이 30ms, 송신각 범위  $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ , 주파수 30kHz, 풍속 10m/s, 해저퇴적물 평균입도  $8 \phi$ 를 사용하였다. 잔향음 모델을 통해 구현된 시간영역 신호는 산란 신호 특성이 잘 적용되어 시뮬레이션 할 때 마다 매번 다른 형태와 크기를 갖는 신호들이 생성되었으며, 실측 신호와 마찬가지로 많은 신호를 연속적으로 모의한다면 중심 극한 정리에 의한 산란 신호의 통계적 특성을 가지게 된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 천해 거리독립 해양환경에서 고속으로 이동하는 음원의 고주파 잔향음 준위를 신속하게 계산하는 알고리즘을 개발하였고 경계면 산란 신호의 통계적 특성을 고려한 시간영역 잔향음 신호를 모의하였다. 본 논문에서 개발된 잔향음 모델에는 몇 가지 장점을 가진다. 첫째 송신각의 최적화 방법을 이용하여 단 한번의 음선추적으로 경계면에 영향을 주는 모든 고유음선 정보를 계산하기 때문에 신속한 연산이 가능하다. 둘째 음원이 고속으로 이동할 경우 산란 경로 탐색 알고리즘을 적용하여 산란

Table 1. Reverberation model input parameters.

Reverberation model input parameter	
System parameter	Environmental parameter
Frequency (Unit : Hz)	SSP(Sound speed profile) (Constant, Munk, User file)
Band width (Unit : Hz)	Mean grain size (Unit : $\phi$ )
Source level (Unit : dB)	Wind speed (Unit : m/s)
Pulse length (Unit : s)	Sub parameter
Source depth (Unit : m)	Volume reverberation (ON or OFF)
Source speed (Unit : m/s)	Statistic value (ON or OFF)
Source angle (Unit : deg)	TVG Gain (ON or OFF)
Range (Unit : m)	Doppler effect (ON or OFF)
Rev. time (Unit : s)	Beam pattern (ON or OFF)
Water depth (Unit : m)	Ambient noise (Wenz or Coastal model)
Pulse type (CW, FM, WCW, HFM)	

음파의 수신 경로를 계산한다. 셋 째 고속으로 이동하는 음원에서 송신된 음파가 각 경계면에서 산란된 후 음원에 수신될 때 발생하는 주파수 변이를 고려한다. 넷 째 산란 신호의 통계적 특성을 고려하여 시간 영역 잔향음 신호모의가 가능하다. 다섯 째 Table 1에서와 같이 다수의 입력 가능한 변수 및 기능을 설정하여 다양한 환경에서 시뮬레이션이 가능하다.

모의된 잔향음 신호의 검증은 위해 대상해 상실험을 실시하여 실측 신호와 모의 신호 결과를 비교하였다. 비교 결과로부터 본 연구에서 개발된 잔향음 모델이 한국 천해 고주파 잔향음 예측 시 적용가능함을 확인하였으나, 이동음원에 의한 잔향음 실험이 불가능하였으므로 고정음원에 의한 잔향음 실측 신호와의 비교만을 수행한 아쉬움이 있다. 따라서 향후 다양한 환경에서 고속으로 이동하는 음원으로 부터 실측된 잔향음 신호와 모의 결과의 비교분석을 통한 검증이 추가적으로 요구되며, 거리종속 환경에서 잔향음 신호모의로의 확장이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 국방과학연구소(계약번호: UD090018DD) 지원으로 수행되었습니다. 모델 검증을 위한 잔향음 신호 측정에 많은 지원과 도움을 주신 한국해양과학기술원 해양방위센터 강돈혁 박사님께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. H. Weinberg, "CASS roots," OCEANS 2000 TS/IEEE Conference Proceedings, 1071-1076 (2000).
2. R. E. Keenan, "An introduction to GRAB eigenrays and CASS reverberation and signal excess," OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference Proceedings, 1065-1070 (2000).
3. S. G. Chamberlain and J. C. Galli, "A model for numerical simulation of nonstationary sonar reverberation using linear spectral prediction," IEEE J. of Oceanic Engineering, **8**, 21-36 (1983).
4. P. C. Etter, *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*, (Spon Press, London and New York, 2003).
5. J. W. Choi, K. S. Yoon, J. Na, J. S. Park, and Y. N. Na, "Shallow water high-frequency reverberation model" (in Korea), J. Acoust. Soc. Kr. **21**, 671-678 (2002).
6. T. H. Oh, H. S. La, J. Y. Na, and C. Y. Park, "Mid-frequency bistatic reverberation model" (in Korea), J. Acoust. Soc. Kr. **25**, 389-394 (2006).
7. Y. M. Chu, W. J. Seong, I. S. Yang, and W. T. Oh, "Mid frequency band reverberation model development using ray theory and comparison with experimental data" (in Korea), J. Acoust. Soc. Kr. **28**, 740-754 (2009).
8. S. I. Kim, Y. S. Kim, Y. N. Na, and Y. G. Kim, "Monostatic reverberation calculation using the BELLHOP model" (in Korea), J. Acoust. Soc. Kr. Suppl. 1(s) **28**, 456-457 (2012).
9. H. Medwin and C. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography* (Academic Press, New York, 1997).
10. L. Xavier, *An Introduction to Underwater Acoustics*, (Springer, Chichester UK, 2002).
11. F. Jensen, W. Kuperman, M. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics* (American Institute of Physics, New York, 1993).
12. 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).
13. R. J. Urick, *Principle of Underwater Sound* (McGraw-Hill, New York, 1983).
14. W. B. Lee, J. M. Joo, S. H. Kim, J. W. Choi, J. S., and Park, W. S. Kim, "Ray-based simulation of high-frequency reverberation level" (in Korea), J. Acoust. Soc. Kr. Suppl. 2(s) **29**, 220-221 (2010).
15. 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).

16. N. C. Makris, "The effect of saturated transmission scintillation on ocean acoustic intensity measurements," J. Acoust. Soc. Am. **100**, 769-783 (1996).
17. 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).
18. 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).

## 저자 약력

### ▶ 김 선 효(Sunhyo Kim)



2009년 2월: 한양대학교 (이학사)  
2011년 2월: 한양대학교 (이학석사)  
2011년 9월 ~ 현재: 한양대학교 박사과정

### ▶ 이 원 병(Wonbyoung Lee)



2001년 2월: 해군사관학교 (이학사)  
2005년 2월: 한양대학교 (이학석사)  
2012년 8월: 한양대학교 (이학박사)  
2012년 8월 ~ 현재: 해군해양전술정보단

### ▶ 유 승 기(Seung-ki You)



2002년 2월: 한양대학교 (이학사)  
2004년 2월: 한양대학교 (이학석사)  
2004~2009년 (주)환경과학기술 정보사  
업팀 팀장  
2009년 9월~ 현재: 한양대학교 박사과정  
2010년 ~ 현재: LIG넥스원 M&S 연구센터  
선임연구원

▶ 최 지 웅(Jee Woong Choi)



1996년 2월: 한양대학교 (이학사)  
 1998년 2월: 한양대학교 (이학석사)  
 2002년 8월: 한양대학교 (이학박사)  
 2002년 11월 ~ 2007년 8월: Applied Physics Lab., Univ. of Washington, USA, Research Associate  
 2004년 ~ 현재: 미국음향학회 수중음향 기술위원회 위원  
 2007년 9월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합과학과 부교수

▶ 박 정 수(Joung Soo Park)



1988년 2월: 한양대학교 (이학사)  
 1990년 2월: 한양대학교 (이학석사)  
 2006년 2월: 한국해양대학교 (공학박사)  
 1990년 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원

▶ 김 우 식(Wooshik Kim)



1991년 2월: 한국외국어대학교 (이학사)  
 1993년 2월: 한국외국어대학교 (이학석사)  
 2005년 2월: 한국해양대학교 (공학박사)  
 1993년 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원

▶ 박 경 주(Kyoung Ju Park)



1990년 3월: 해군사관학교 (이학사)  
 1998년 2월: 군사과학대학원 (이학석사)  
 2003년 2월: 한양대학교 (이학박사)  
 2010년 ~ 현재: 해군사관학교 해양학과 조교수