

# 천해 저주파 양상태 잔향음 모델

## Bi-static Low-frequency Reverberation Model in Shallow Water

김 남 수\*, 오 선 택\*, 윤 관 섭\*, 이 성 옥\*, 나 정 열\*  
(Namsoo Kim\*, Suntaek Oh\*, Kwan-Seob Yoon\*, Seongwook Lee\*, Jungyul Na\*)

\*한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실

(접수일자: 2003년 3월 27일; 수정일자: 2003년 4월 16일; 채택일자: 2003년 6월 15일)

천해에서 포물선 근사 (parabolic approximation)에 기초한 저주파 양상태 잔향음 모델 (*LHYREV-B*, Low-frequency Hanyang univ. Reverberation model-Bi-static)을 제안하였다. *LHYREV-B* 모델에서는 해저와 해저지형 내의 상호작용을 포함하는 음향모델에 수평입사각에 독립인 산란함수를 이용하여 양상태 잔향음을 계산하였다. 모델의 검증용 위하여 실제 잔향음 신호와 비교하였으며, 비교 결과 *LHYREV-B* 모델이 저주파 잔향음 예측에 적합함을 확인할 수 있다.

**핵심용어:** 잔향음 모델, 양상태, 산란함수, 전달손실, 잔향음 준위

**부고분야:** 수중음향 분야 (5.2)

Low-frequency bi-static reverberation model (*LHYREV-B*, Low-frequency Hanyang univ. Reverberation model-Bi-static) based on the parabolic approximation for shallow water environment is presented. In this paper bistatic reverberation level is computed using the angle-independent scattering strength function and the wave-based acoustic model. The signal simulated by the *LHYREV-B* model is compared with the observed signals and it is shown that the *LHYREV-B* model provides a closer fit to the observed signals.

**Keywords:** Reverberation model, Bi-static, Scattering strength, Transmission loss, Reverberation level

**ASK subject classification:** Underwater Acoustics (5.2)

## I. 서론

천해에서 저주파 소오나 (SONAR)를 운용시 일반적으로 음속구조에 의해 해수면이나 체적에 의한 잔향음 보다는 해저지형 등의 경계면에 의한 해저면 잔향음의 영향이 우세하며[1], 이러한 해저면 잔향음 생성에 영향을 주는 요인으로는 해저면의 저질기와 퇴적층 내의 비 균질성의 상호작용에 의한 영향을 들 수 있다[2].

음원과 수신기가 다른 위치에 있는 양상태 및 수신기가 여러 개 있는 다중상태 (multi-static) 잔향음 연구는 해저의 2차원 (planar)적인 특성을 이해하는데 도움이 될 뿐만 아니라[3], 소오나 시스템 사용자에게 수중 물체를 수동적으로 추적할 수 있는 능력, 단상태와 달리 목표물이 위협의 방향 및 거리를 알지 못하게 함으로 인해 얻어지는 혼란효과, 그리고 목표물의 탐지 후 식별능력 향상 등의 여러 전술적인 이득 (tactical advantage)을

제공한다[4].

따라서 천해에서 효율적으로 양상태 소오나를 운용하기 위해서는 해저면에 의한 양상태 잔향음 특성을 파악하는 것이 중요한 요소로 부각되고 있다.

천해/장거리와 같이 다중경로가 우세한 환경에서 수평입사각 (grazing angle)의 함수인 산란함수를 계산하기 위해 음선추적을 이용하는 음선이론 (ray theory)에 기초한 소오나 모델은 위상정보의 부재로 인해 해저면 상호작용에 의해 생성된 위상이 고려된 다중경로 효과를 예측할 수 없다[5]. 또한 퇴적층내의 비 균질성에 의한 상호작용을 음선이론에 기초한 모델에서는 적절하게 고려할 수 없다는 단점이 있다.

반면에 음파이론 (wave-theory)에 기초한 포물선 방정식 (parabolic equation)이나 정상모드 (normal mode)에서는 천해의 다중경로나 퇴적층 내의 비 균질성에 의한 전파문제를 해결할 수 있다는 장점이 있는 반면 잔향음 계산시 시간영역으로의 변환과 해저면에서의 산란함수를 포함해야 하는 문제가 있다.

따라서 본 논문에서는 천해에서 저주파수 음파전달을

책임저자: 김남수 (knamsoo@ihanyang.ac.kr)  
425-791 경기도 안산시 사1동 1271번지  
한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실  
(전화: 031-400-4156; 팩스: 031-406-6458)

정확하고 빠르게 계산할 수 있는 PE 모델을 이용하여 광대역 주파수 영역에서의 전달손실을 예측하고, 시간영역에서의 계산을 위해 역 푸리에 합성 (Inverse Fourier synthesis)을 이용 시간영역에서의 음장을 계산한다.

또한 산란효과를 고려하기 위해 일반적으로 사용하는 음장의 분해와 수평입사각의 변화에 의한 산란강도를 계산하는 것은 PE 모델로는 불가능하기 때문에 본 논문에서는 이 문제를 산란이 일어나는 곳에서 총 음장 (total field)에 의한 영향을 포함하되 수평입사각에는 독립인 산란함수와 소오나 방정식을 이용해서 해지면 잔향음을 계산하고자 한다[8].

본 논문의 구성은 다음과 같다.

II장에서 제안한 LHYREV-B 알고리즘을 설명하고, III장에서는 모델을 검증하기 위해서 2001년 8월 서해중부 해역에서 실시한 잔향음 실측자료와 비교하였으며, 또한 제안한 모델의 해지면 특성 변화에 따른 민감성에 대해서도 확인하였다. 마지막으로 IV장에서 결론을 도출하였다.

## II. LHYREV-B 모델 알고리즘

일반적으로 음원과 수신기가 무지향성이라면 잔향음을 계산하기 위한 소오나 방정식은 다음과 같다.

$$RL = SL - TL, -TL, +10\log(\Delta A_s / R_0^2) + S_s \quad (1)$$

여기에서  $RL$ 은 잔향음 준위,  $SL$ 은 음원준위를 나타내며,  $TL_s$ 와  $TL_r$ 은 각각 산란구역에서 음원 및 수신기까지의 전달손실을 나타내며,  $\Delta A_s$ 는 음원의 펄스길이와 수신기의 빔 패턴 등에 의한 입사면적 (ensonified area)을 나타내며,  $S_s$ 는 해지면 입사면적에서의 산란강도를 나타낸다.

본 논문에서 잔향음 준위를 모의하기 위해 사용된 알고리즘은 그림 1에 나타나있다. 첫 번째 단계는 전달손실 모델을 통해서 음원에서 각각의 산란체 그리고 산란체에서 수신기까지의 수심방향의 해 (depth equation)를 광대역에서 계산한다. 여기에서 구해진 각각의 수심방향의 해는 거리 해 (radial equation)와 곱해짐으로써 음압을 계산한다.

모델을 검증하기 위한 실험 시 사용된 음원이 MK-61 SUS (signals underwater sound)이기 때문에 그림 2와 같이 먼저 MK-61 SUS의 파형을 모의했다. 모의된 파형에 일정대역에 대한 음원준위를 곱한 후, 일정 대역에서의 신호를 모의하기 위해서 대역통과 필터인 버터워스 (Butterworth) 필터를 통과시킨 파형을 사용했다. 이때 음원은 역 푸리에 변환 (inverse Fourier transform)을 통해 주파수영역에서 계산함으로써 계산량을 줄일 수 있으며, 주파수 영역에서의 곱은 시간영역에서의 콘볼루션

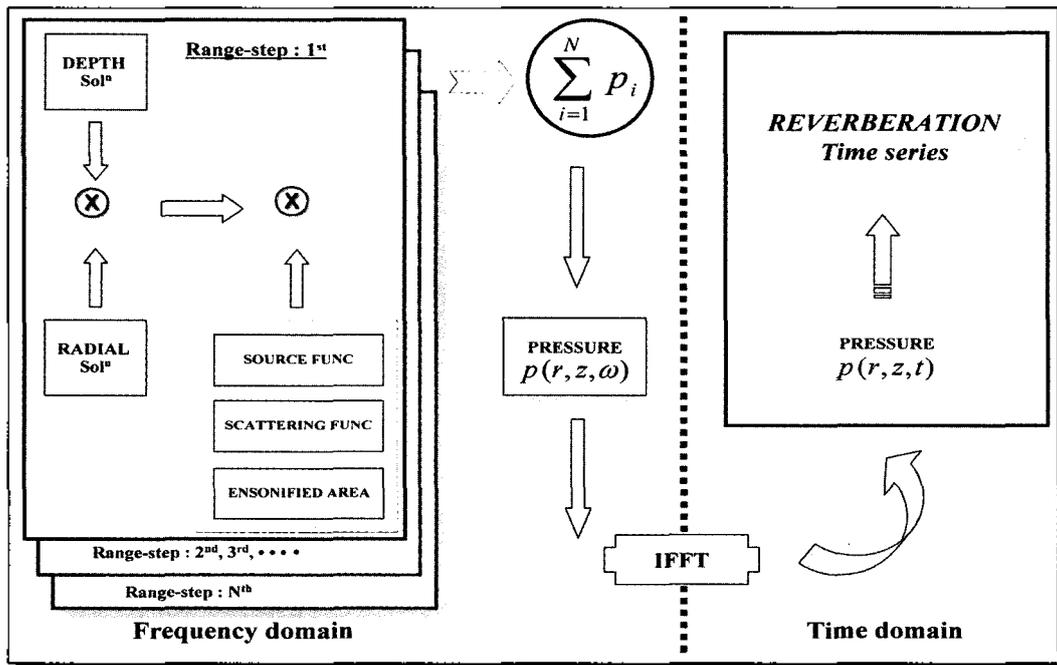


그림 1. LHYREV-B 알고리즘 흐름도  
Fig. 1. Processing flow of LHYREV-B algorithm.

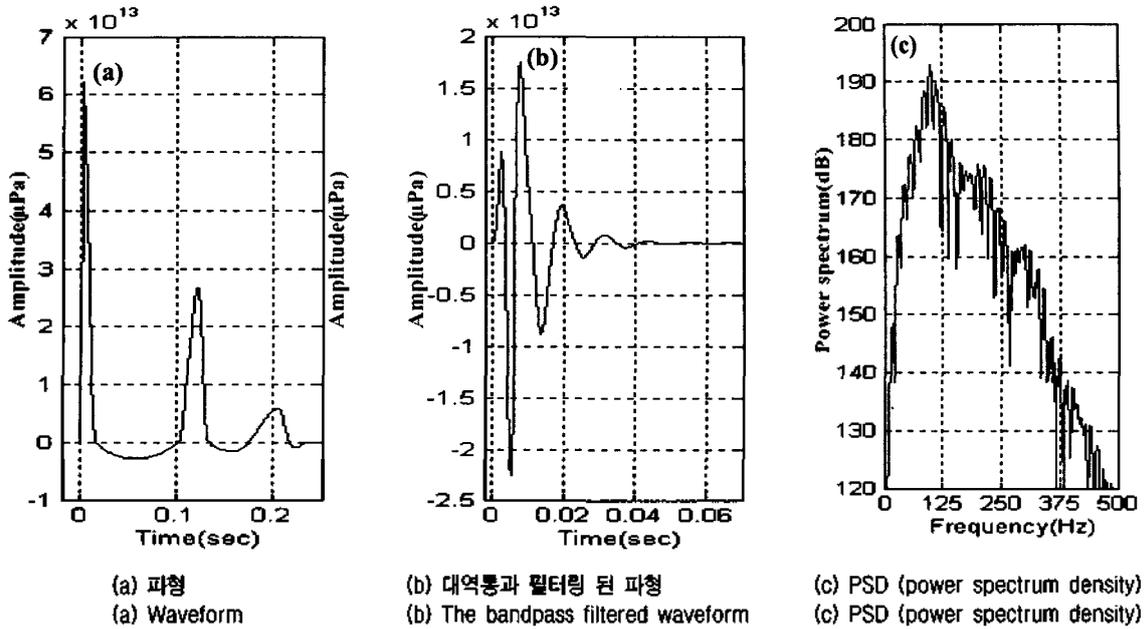


그림 2. 모의된 음원 (MK-61 SUS)  
Fig. 2. Simulated acoustic source (MK-61 SUS).

(convolution)과 같으므로 음원을 곱하는 것은 창함수 (window function)와 같은 효과를 가진다.

또한 산란함수 및 입사면적을 계산한 후 각각의 입사면적을 거쳐서 수신기에 수신된 음압을 더하게 되면 수신기에서 수신된 주파수 영역 음압이 되며, 마지막으로 음파 도달시간을 계산하기 위해 식 (2)와 같이 푸리에 합성을 하게 되면 수신기에서 수신된 시간에 따른 파형을 모의할 수 있다.

$$p(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_{\max}}^{\omega_{\max}} S(\omega) p(r, z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (2)$$

여기에서  $S(\omega)$ 는 음원의 스펙트럼 (source spectrum)이며,  $p(r, z, \omega)$ 는 전달함수 (transfer function) 즉, 음원에서 입사면적을 거쳐서 수신기에 수신된 양방향 전달손실 (two-way transmission loss)을 나타낸다. 그리고 여기에서 사용되는 시간은 실측 값과 비교를 위해서 환산시간 (reduced time)을 사용한다. 환산시간은 식 (3)과 같이 쓸 수 있으며,  $t'$ 는 음원에서 방사되어 수신기에서 수신될 때까지의 실제 도달시간 (travel time)을 나타낸다(6).

$$t = t' - r/c_{\max} \quad (3)$$

이후 모의된 파형을 힐버트 변환 (Hilbert transform) 하여 포락선 (envelope)을 구한 후 대수적 (logarithmic)으로 표시하면 잔향음 준위를 계산할 수 있다.

다음 절은 이때 사용된 각각의 모델이다.

### 2.1. 전달손실 모델

원통 좌표계를 사용한 축대칭 환경에서 Helmholtz 방정식의 해는 식 (4)와 같이 쓸 수 있다[5].

$$p(r, z) = \psi(r, z) H_0^{(1)}(k_0 r) \quad (4)$$

여기에서,  $H_0^{(1)}(k_0 r)$ 는 거리 해를 나타내며, 식 (5)와 같이 근사치를 사용하며, 각각의 거리에서 수심방향의 해는  $\psi(r, z)$ 가 나타낸다.

$$H_0^{(1)}(k_0 r) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 r}} e^{i(k_0 r - \pi/4)} \quad (5)$$

PE 모델은 바로 이 수심방향의 해를 구하는 과정이다.

LHYREV-B 모델에서 사용된 전달손실 모델은 UMPE (University of Miami PE) 모델을 사용했으며[7], 이 모델을 이용해서 수심방향의 해를 계산하였다. 그리고 거리 해는 식 (5)를 이용해서 LHYREV-B 모델에서 계산, 수심방향의 해와 곱함으로써 광대역 주파수영역 음압 (pressure)을 계산하였다.

### 2.2. 경계면 산란 모델

경계면 산란 모델의 유도를 위해서, 식 (6)~(14)는 참고문헌 8에 따라 유도하였다.

경계면에서 산란이 일어나는 곳의 총 음장에 의한 영향을 받는 수평입사각에 독립인 산란함수를 만들기 위해서, 섭동이론 (perturbation theory)을 이용하여 양방향 전달 손실 (two-way transmission)과 같은 개념인 잔향손실 (reverberation loss)의 개념을 도입한다. 해저면에 의한 잔향손실  $RL_b(r, \phi)$ 은 양방향 전달손실과 산란함수로 이루어져있으며, 식 (6)과 같다.

$$RL_b(r, \phi) = \left[ \frac{\Delta c}{c_0} \right]^2 k_0^4 W_b \left[ \frac{\Delta A_b}{R_0^2} \right] \left[ \frac{R_0}{r} \right]^2 2 \langle |\psi_b|^2 \rangle \quad (6)$$

여기에서  $\psi_b(r, \phi)$ 는 총음장에 관련된 PE의 수심방향 테이며,  $W_b(r, \phi)$ 는 해저면 거칠기의 스펙트럼 (roughness spectrum)으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W_b(2k_0 \sin \phi, 2k_0 \cos \phi; r, \phi) = \int_{\Delta A_b} \langle \zeta_b(x, y) \zeta_b(x+x', y+y') \rangle e^{2i\phi_0'} dx' dy' \quad (7)$$

여기에서  $\zeta_b(x, y)$ 는 경계면의 국부적인 거칠기인데, 해저 경계면  $z_b(x, y)$ 은 해저면의 평균수심 (mean bottom relief)  $\bar{z}_b(x, y)$ 와 산란에 관련된 경계면의 국부적인 거칠기  $\zeta_b(x, y)$ 의 합이다.

이것을 대수적으로 다시 쓰면

$$RL_b(r, \phi) = -10 \log \left[ F_b(r, \phi) \left[ \frac{R_0}{r} \right]^2 2 \langle |\psi_b(r, \phi)|^2 \rangle \right] \quad (8)$$

여기에서 산란함수  $F_b(r, \phi)$ 는

$$F_b(r, \phi) = \left[ \frac{\Delta c}{c_0} (r, \phi) \right]^2 k_0^4 W_b(2k_0 \sin \phi, 2k_0 \cos \phi) \quad (9)$$

따라서 경계면에서 해저면 거칠기에 의한 산란함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\xi_b = 10 \log [2F_b(r, \phi)] \quad (10)$$

식 (10)은 단상태 (monostatic) 산란함수를 나타낸다. 이제 양방향 산란함수를 나타내기 위해서 각각 수신기/음원의 위치를  $(r_s, \phi_s) / (r_r, \phi_r)$ 라 하고, 경계면내 입사면적의 위치를 라 하면 음원에서 입사면적 그리고 입사면적에서 수신기까지의 전달손실은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$TL_{br} = -10 \log \left[ \left[ \frac{R_0}{r_s} \right] \langle |\psi_b(r_s, \phi_s)|^2 \rangle \right] \\ TL_{br} = -10 \log \left[ \left[ \frac{R_0}{r_r} \right] \langle |\psi_b(r_r, \phi_r)|^2 \rangle \right] \quad (11)$$

그리고 경계면 거칠기에 의해 주어진 양상태 산란함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_b = 10 \log [F_b(r, \phi)] \quad (12)$$

여기에서  $F_b(r, \phi)$ 는

$$F_b(r, \phi) = \left[ \frac{\Delta c}{c_0} (x_s, y_s) \right]^2 k_0^4 W_b [k_0 (\sin \phi_s + \cos \phi_s), k_0 (\cos \phi_s + \sin \phi_s)] \quad (13)$$

그런데 LHYREV-B 모델에서는 수평각의 굴절을 고려하지 않는 평면 (in-plane)에서만 계산함으로  $\phi_s = \phi_r = 0$  이되므로 최종적으로 양상태 산란함수는 수평입사각에 독립이며, 경계면에서 거칠기의 함수로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_b(r, \phi) = \left[ \frac{\Delta c}{c_0} (x_s, y_s) \right]^2 k_0^4 W_b(2k_0) \quad (14)$$

### 2.3. 양상태 입사면적 (Bistatic ensonified area)

양상태 산란함수를 계산시, 양상태 입사면적을 계산하는 것은 수평입사각뿐만 아니라 산란각과 양상태각 (bistatic angle)을 계산해야 한다. 양상태 입사면적을 계산하기 위해서 본 논문에서는 Cox의 방법을 사용했다[9]. Cox의 방법에서 양상태 입사면적 ( $A_b$ )은 다음과 같이 주어진다.

$$A_b = \frac{c\tau}{2} r_{sr} \Phi_r B(\gamma) \quad (15)$$

여기에서  $c$ 는 참조음속 (reference sound speed),  $\tau$ 는 음원의 펄스간격 (source pulse length),  $r_{sr}$ 은 입사면적에서 수신기까지의 거리,  $\Phi_r$ 은 수신기 빔폭 (receiver beam width), 그리고  $B(\gamma)$ 는 양상태 지형에 따른 양상태 계수 (bistatic factor)이고 다음과 같이 계산한다.

$$B(\gamma) = 1 + \frac{(r_{sr} / R_M)^2 \sin^2 \gamma}{4 [1 + (r_{sr} / R_M) (1 - \cos \gamma)] / 2} \\ (R_M = c\tau / 2 = (r_{sr} + r_{sr} - r_{sr}) / 2) \quad (16)$$

$B(\gamma)$ 는 단상태 ( $r_{sr}=0$ )나  $r=0$ ,  $r=180^\circ$ 에서는 1이고 다른 각도에서는 1보다 크다. 따라서 본 논문에서  $B(\gamma)$ 는 1을 사용한다.

### III. 잔향음 실험

#### 3.1. 잔향음 실험

해저수심이 거의 일정한 천해의 해양환경에서 음파전달에 미치는 음속구조 및 해저지질의 영향을 파악하기 위해서 양상태 저주파 잔향음 실험을 2001년 8월 서해 중부해역에서 실시하였다. 실험해역의 위치는 그림 3과 같이 서해중부해역이다.

해저지질의 특성 등 환경변수 및 시스템변수는 표 1과 같으며, 수평적인 변이 (lateral variability)가 거의 없는 지역이다. 실험지역의 평균수심은 76 m을 사용했지만 산란모델을 위한 국부적인 경계면 거칠기 (locally small

scale relief)는 실험자료의 부족으로 인해 평균 0.1 m을 가지도록 확률적으로 처리했다. 음원은 광대역 신호를 분석하기 위해서 MK-61 SUS를 사용했으며, 폭파수심은 18 m으로 고정했다. 신호의 수신을 위해서 B&K8101 수신기를 사용하였으며, 분석주파수 대역 50-150 Hz에서의 수신감도는 -184.3 dB이다. 청음기에 수신된 신호는 KH 3940 필터를 통해 대역 통과 필터링 후 B&K2636 증폭기를 통해 증폭, 수신되었으며 이 신호는 B&K 레코더에 저장되었다. 저장된 신호는 16 bit NI DAQ 보드를 통해 10 kHz으로 A/D 변환하였다.

이때 수심 별 음속구조를 계산, 그림 4와 같이 고유음선 추적 (Eigenray tracing)을 수행한 결과, 음파는 해저면과 상호작용을 하며 수신기에 수신되며 따라서 수신된 신호는 거의 해저면 잔향음의 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

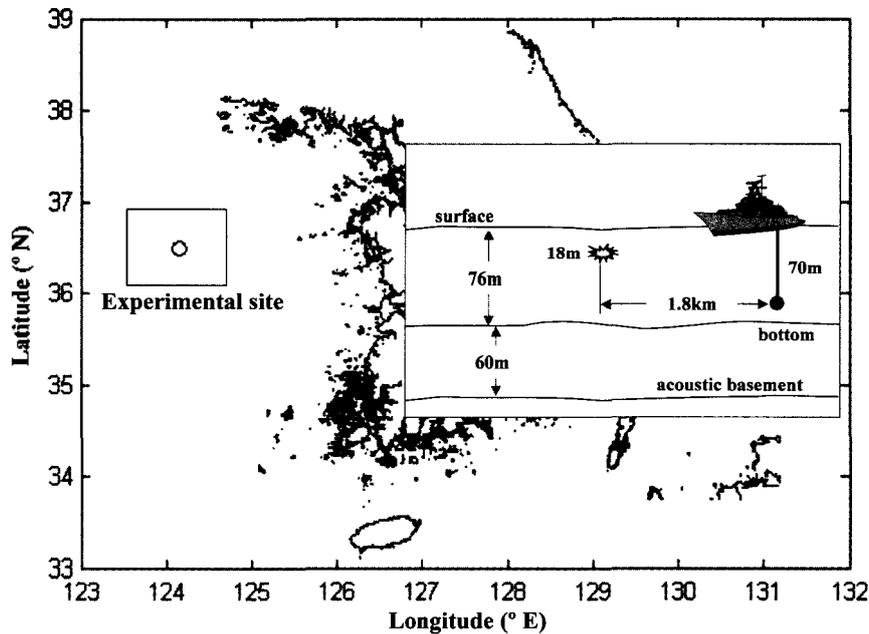


그림 3. 실험위치  
Fig. 3. Locations of experiments.

표 1. 환경 및 시스템 변수  
Table 1. The parameters of system and environment.

Center Frequency	150 Hz	Bottom property	Sand
Frequency bandwidth	100 Hz	Density of sediment	1.91 gm <sup>3</sup>
Number of Frequency	512	Attenuation coefficient	0.90 dB/λ
Source level	261.2 dB	The thickness of the sediment	60 m
Mean depth	76 m	RMS roughness height	0.1 m

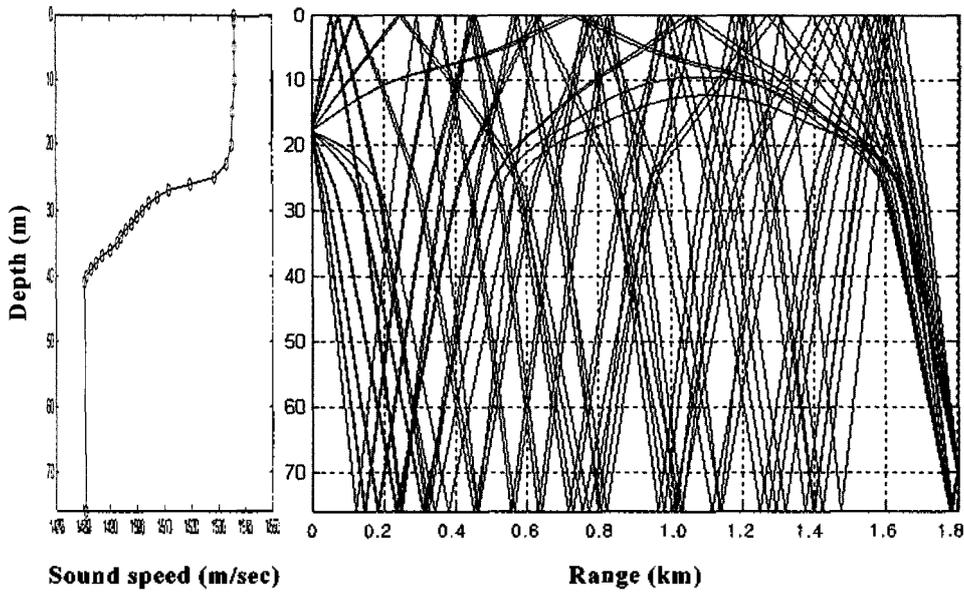


그림 4. 고유음선 추적  
Fig. 4. Eigenray tracing.

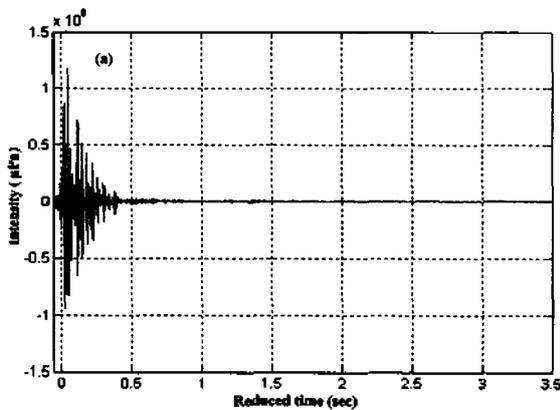
3.2. LHYREV-B 모델과 실측신호의 비교

그림 5는 실험시의 수신된 파형 및 진향음을 LHYREV-B 모델을 이용해서 모의한 결과이다. 음원과 수신기의 거리가 1,800 m 떨어져 있기 때문에 신호는 약 1.198 초 이후부터 수신되지만, 모델과 실측 값의 비교를 위해서 환산시간을 사용했다. 또한 거리 5.0 km 및 주파수 개수를 512개를 사용했기 때문에 주파수 간격은 약 0.195 가 되며, 총시간 (total time)은 5.12초가 된다. 따라서 수신기에 최초로 수신된 신호가 1.198초이므로 이후 약 3.9초 까지 신호를 분석할 수 있다.

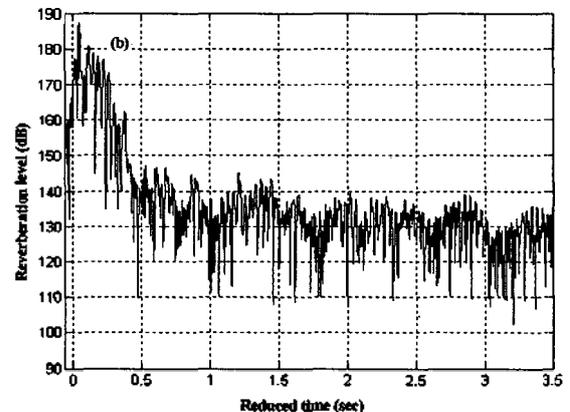
실제 해양에서 수신된 신호는 경계면에서 반사(reflec-

tion), 전방산란 (forward scattering), 측방산란 (side scattering), 그리고 후방산란 (back scattering)된 신호들의 시간에 따른 합이나, 본 논문에서는 해저면의 수평적인 변이가 거의 없는 지역에 의한 영향을 계산하기 때문에 측방산란은 계산하지 않는다 (평균 상태). 따라서 음원과 수신기 사이의 거리에서는 반사 및 전방산란이 중요한 요소가 되며 수신기 이후의 거리에서는 후방산란이 중요한 요소가 된다.

그림 6은 음원에서 각각의 거리증분에 있는 입사면적을 거쳐서 수신기에 들어온 음압을 시간영역으로 표시한 그림이다. 세로축이 거리 증가에 따른 입사면적의 순서



(a) 파형  
(a) Waveform



(b) 진향음 준위  
(b) Reverberation level

그림 5. LHYREV-B에 모의된 진향음 신호  
Fig. 5. The reverberation level predicted by LHYREV-B model.

를 나타내며, 가로축은 환산시간을 나타낸다. 그러므로 이들 모든 음압을 더한다면 수신기에서 수신된 시간에 따른 총 음압을 나타내며, 그림 5와 같이 파형 및 잔향음 준위를 계산할 수 있다. 또한 그림 6을 살펴보면, 0.2초까지는 음원과 수신기 사이에서 반사 및 전방산란된 신호라는 것을 확인할 수 있으며, 0.2초가 지나면 수신기 이후의 해저 경계면을 부딪히고 들어오는 후방산란이 중요한 신호라는 것을 확인할 수 있다.

모의된 *LHYREV-B* 모델을 검증하기 위하여 실측신호와 비교하였다. 그림 7은 *LHYREV-B* 모델과 실측신호의 파형 (waveform)을 비교한 것이다. 세로축은 음압강도를 나타내는데, 모의된 신호는 음원준위를 포함한 음압을 나타내며, 실측 값은 수신감도 (RVS, receiving voltage sensitivity) 및 신호이득 (gain)을 포함하지 않았지만, 그림 8과 같이 포락선을 취해서 잔향음 준위를 계산하면 같다는 것을 알 수 있다. 그림 7의 두 신호를 비교시 상대적으로 강하게 수신되는 신호 (peak pressure) 및 신호 지속시간 (signal duration)이 거의 동일함을 알 수 있으나, 약 0.5초 후가 되면 모델은 신호를 계속 모의하는데 반해서 실측신호는 *B&K* 레코더의 동적 영역이 42 dB이기 때문에 거의 일정하다는 것을 알 수 있다[10]. 이것은 잔향음 준위를 비교시 더 명확하게 나타나는데, 그림 8을 보면 약 0.5초까지는 실측 값과 모의된 준위가 4-5 dB의 차이로 비교적 경향이 같은데 비해 0.5초가 지나면 실측 신호는 약 142-143 dB으로 일정한 반면에 *LHYREV-B* 모델은 시간이 지날수록 경계면에서의 전달손실과 산란 강도 및 입사면적이 달라짐으로 인해 잔향음 준위가 변동 (fluctuation)을 하면서 점차 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서 더 효과적인 모델 검증을 위해서는 실험시 수십 초까지 신호를 구별할 수 있도록 수신기의 신호이득을

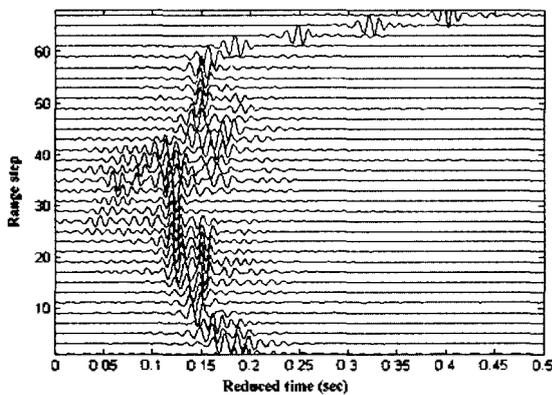


그림 6. 각각의 거리증분을 통과한 수신기에서의 파형  
Fig. 6. Stacked time series at the receiver through each range step.

조정해서 수신해야 할 것이다.

### 3.3. LHYREV-B 모델의 환경변화에 변화양상

환경변화의 따른 *LHYREV-B* 모델의 변화양상을 확인하기 위해 동일한 해양 환경에서 표 2와 같이 퇴적층의 성질 및 해저면의 거칠기를 변화시켜 가면서 신호를 모의했다. 모든 환경변수는 같은 상태에서 서해 실험해역 인

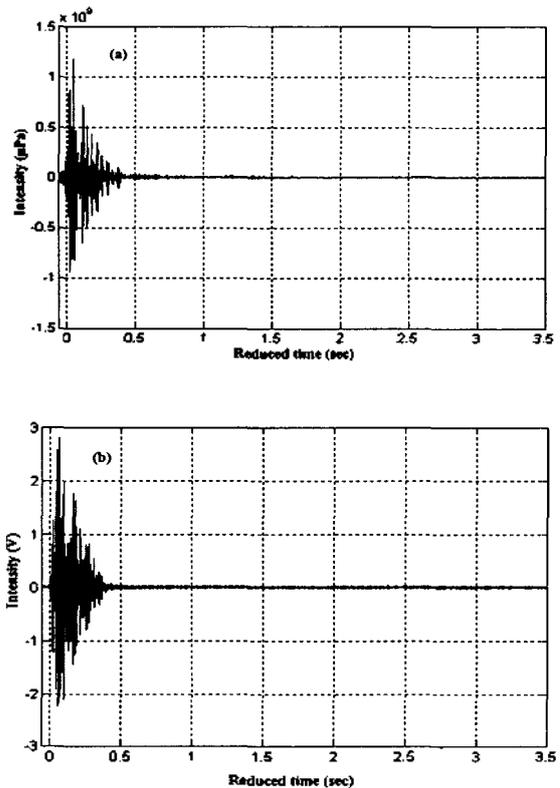


그림 7. (a) 모의 및 (b) 실측 파형 비교  
Fig. 7. Comparison of (a) model predictions with (b) measured waveform.

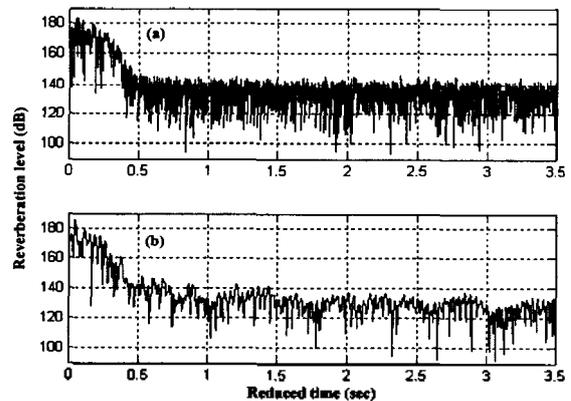


그림 8. 실측신호(a) 및 모의신호(b) 비교  
Fig. 8. Comparison of (a) measured data with (b) simulated signal.

근에서 많은 분포를 보이는 점토 (clay), 미사 (silt)에서의 잔향음 준위를 모델의 입력 자료인 모래 (sand)와 비교했다. 또한 해저면의 거칠기를 변화시켜 가면서 잔향음 준위의 변화양상을 확인했다.

그림 9는 퇴적층 성질에 따른 잔향음 준위의 변화를 나타낸 것이다. 각각의 퇴적층의 성질에 따라 임계각 (critical angle)이 달라지고 이에 따라 해저 내로 투과되는 에너지가 달라짐으로 인해 약 15-20 dB의 현격한 잔향음 준위 차이를 나타내기 때문에, 모래에서 점토로 또는 기사에서 점토가 인접한 부분에서는 신호에 커다란 변형

이 생길 것으로 예측할 수 있다.

그림 10은 해저면의 거칠기에 따른 잔향음 준위를 모의한 것이다. 해저면의 거칠기가 산란강도의 함수이기 때문에 해저면의 거칠기가 커질수록 산란강도가 커지면서 잔향음 준위는 커진다는 것을 확인할 수 있다.

전체적으로 환경 변화에 대해서 LHYREV-B 모델이 잘 반영한다는 것을 확인할 수 있었으나 후속 검증을 위해서는 다양한 환경하에서 실험이 요구된다.

표 2. 퇴적층의 성질 및 해저면 거칠기

Table 2. The sediment property [6] and rms height of the bottom roughness.

Case	Sediment type	Density ( $gm^3$ )	Sound speed (m/s)	Attenuation coefficient ( $dB/\lambda$ )	The rms height of the bottom roughness (m)
1	Clayey silt	1.50	1,515	0.15	0.5
	Sand-silt-clay	1.60	1,560	0.20	
	Silty sand	1.80	1,650	1.10	
	Course sand	2.00	1,800	0.90	
2	Silty sand	1.80	1,650	1.10	0.5
					1.0
					2.0
					5.0

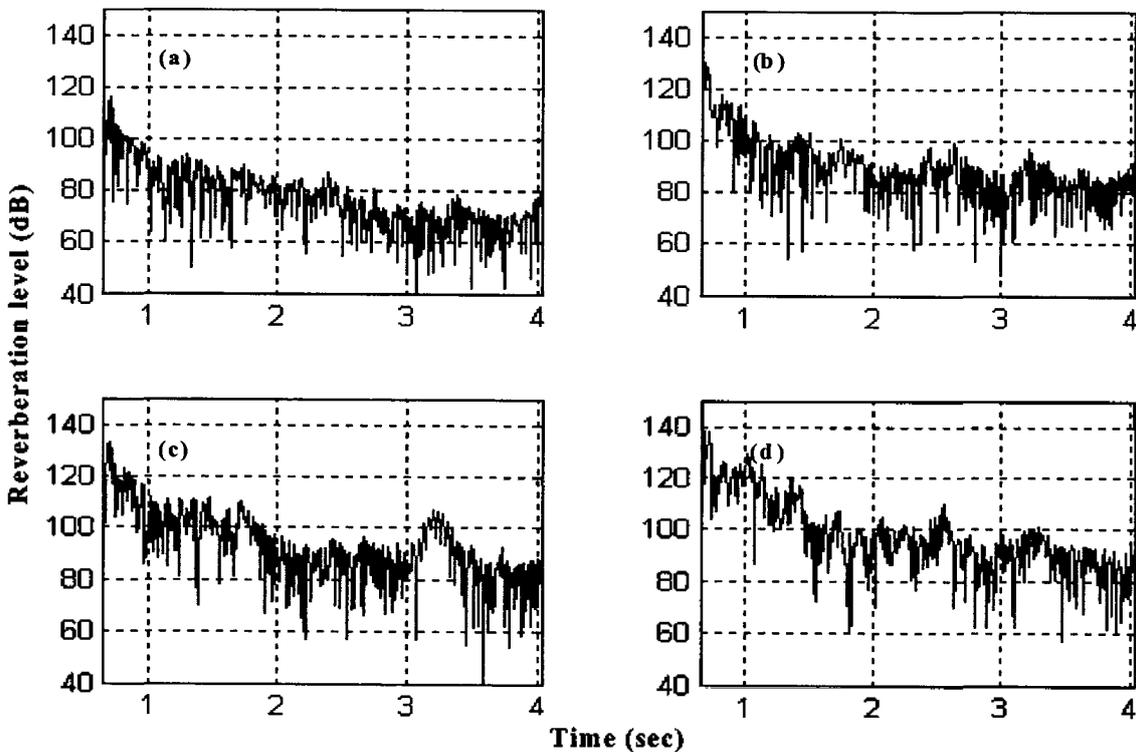


그림 9. 퇴적층 성질에 따른 잔향음 준위 변화

Fig. 9. Variation of model predictions varying with sediment property. The property of the sediment is (a) Clayey silt (b) Sand-silt-clay (c) Silty sand (d) Course sand.

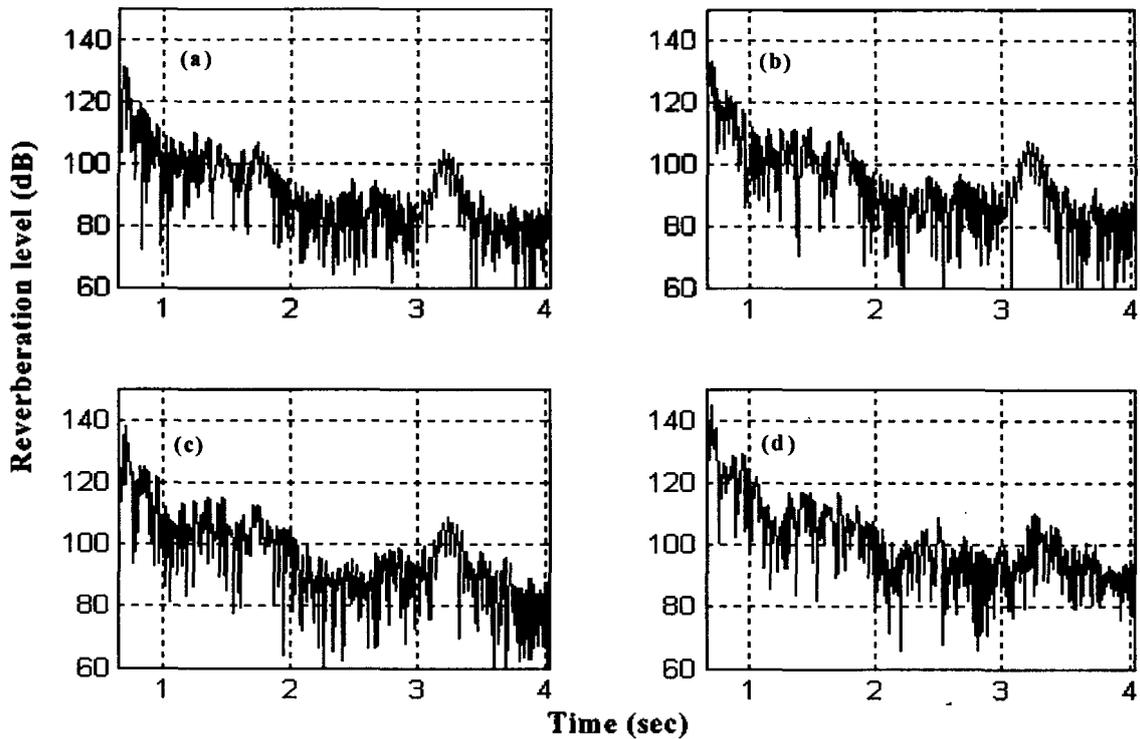


그림 10. 해저면 거칠기에 따른 잔향음 준위 변화  
 Fig. 10. Variation of model predictions varying with rms height of the bottom roughness. The rms height of the bottom roughness is (a) 0.5 m (b) 1.0 m (c) 2.0 m (d) 5.0 m.

#### IV. 결론 및 토의

본 논문에서는 천해 양상대 저주파 잔향음 모델 (LHYREV-B)을 제안하였다. LHYREV-B 모델은 천해에서 저주파 잔향음 예측에 적합하도록 개발되었으며, 잔향음 신호뿐만 아니라 수신신호의 파형까지 모의할 수 있도록 고려되었다. LHYREV-B 모델에 의해 모의된 파형 및 잔향음 신호와 실측 파형 및 잔향음 신호와 비교한 결과 비교적 잘 일치하였다. 또한 여러 가지 환경 변화를 잘 반영한다는 것도 확인할 수 있었다.

그러나 모델의 정확한 검증과 보안을 위해서는 수신기의 신호이득 및 동적 영역 (dynamic range)을 조정해서 장시간 정확한 신호를 분석할 수 있도록 실험해야 하며, 또한 다양한 해양환경에서 측정된 잔향음 신호와의 비교 분석이 필요하다.

특히 3차원적인 해저 지형에 의한 영향을 고려하기 위해, 탈평면 (out-of-plane)에 의한 효과를 고려할 수 있는 전달손실 모델을 도입해야 하며, 본 논문에서 고려하지 않은 해수면 잔향음 모델을 연구해야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 수중음향특화연구센터의 연구지원에 의하여 수행되었음.

#### 참고 문헌

1. 김형수, 최지웅, 나정열, 석동우, "퇴적층 구성 매질 및 표면 형태에 따른 후방산란 강도 측정," 한국음향학회지, 22 (1), 78-87, 2003.
2. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, New York, 1983.
3. J.-W. Choi, J.-Y. Na, and W.-J. Seong, "240-kHz Bistatic Bottom Scattering Measurements in Shallow Water," *IEEE J. Ocean Eng.*, 26 (4), 54-62, 2001.
4. L. M. Harvey, *Application of the Sonar Equations to bistatic Echo-Ranging*, Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1982.
5. K. B. Smith, W. S. Hodgkiss, "Propagation and analysis issues in the prediction of long-range reverberation," *J. Acoust. Soc. Am.*, 99, 1387-1404, 1996.
6. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Proter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, ALP Press, New York, 1993.
7. K. B. Smith, *UMPE: The University of Miami Parabolic*

*Equation Model Version 1.1*, MPL Technical Memorandum 432, San Diego, 1993.

8. F. D. Tappert, "Physics of the PE Reverb Model," *ONR-ASRSP Symposium*, La Jolla, CA, 1993.

9. H. Cox, "Fundamentals of bistatic active sonar," *Underwater Acoustic Data Processing*, edited by Y. T. Chan, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988.

10. *Instruction Manual - Tape Recorders Types 7005 and 7006*, Bruel and Kjaer Inc, 1985.

---

## 저자 약력

---

● **김 남 수 (Namsoo Kim)**

1991년 3월: 해군사관학교 조선공학과 (공학사)  
 1999년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학석사)  
 2001년 3월~현재: 한양대학교 지구해양학과 재학 (박사과정)  
 ※ 주관심분야: 수중음향 모델링, 수중음향 신호처리

● **오 선 택 (Suntaek Oh)**

한국음향학회지 제22권 제2호 참조

● **윤 판 섭 (Kwan-Seob Yoon)**

한국음향학회지 제21권 제5호 참조

● **이 성 욱 (Seongwook Lee)**

한국음향학회지 제21권 제5호 참조

● **나 정 열 (Jungyul Na)**

한국음향학회지 제22권 제4호 참조