

저주파수 정상모드 잔향음 모델

Low-Frequency Normal Mode Reverberation Model

오선택, 조성호[†], 강돈혁, 박경주*

(Suntaek Oh, Sungho Cho,[†] Donhyug Kang, and Kyoungju Park*)

한국해양과학기술원 해양방위연구센터, *해군사관학교
(Received March 17, 2015; accepted April 16, 2015)

초 록: 본 논문에서는 천해의 거리 독립환경에서 저주파수 대역의 잔향음 준위를 계산하는 정상모드 잔향음 모델 개발을 제안하였다. 정상모드를 이용하여 음원에서 산란체, 산란체에서 수신기까지의 음파 전달을 계산하였다. 산란 면적에서 상하로 전달되는 음파는 각 모드를 이용하여 고려하였다. 산란함수는 기존에 제시된 해저면 조건을 고려한 람베르트 공식(Lambert's law)과 반사각 부근에서는 Kirchhoff 근사법에 의한 가우시안 형태를 조합하였다. 제안 모델을 검증하기 위해 미국 ONR(Office of Naval Research)이 지원한 제 I회 잔향음 모델링 워크숍(Reverberation Modeling Workshop I, RMW I)의 XI, XV번 문제를 기준으로 상대비교를 수행하였다.

핵심용어: 정상모드, 해저면 잔향음, 산란함수, 람베르트 공식

ABSTRACT: In this paper, a normal mode reverberation model for a range-independent environment of shallow water is proposed to calculate the reverberation level in the low-frequency range. Normal mode is used to calculate the acoustic energy propagating from the source to the scattering area and from the scattering area to the receiver. Each mode is decomposed into up and down going waves to consider scattering strength at the scattering area. The scattering functional form combines Lambert's law with a Gaussian-like term near the specular direction based on Kirchhoff approximation considering bottom condition. For verification of the suggested model, the result is relatively compared to several solutions of the problem XI and XV in the Reverberation Modeling Workshop I sponsored by the US Office of Naval Research.

Keywords: Normal mode, Ocean Bottom reverberation, Scattering function, Lambert's law

PACS numbers: 43.30.Gv

1. 서 론

천해에서 잔향음은 주로 경계면 매질의 특성에 따른 음파의 산란에 의한 것이다. 고주파수를 이용하는 경우 상대적으로 짧은 음파의 전달거리로 인해 일반적으로 음원과 수신기가 동일한 위치에 있는 단상태를 이용하며, 이는 산란체까지의 전달 및 후방산란 경로는 동일하다는 개념을 사용한다. 반면에 저주파수를 이용하는 경우 음원과 수신기가 분리된 양상태 또는 다중상태를 이용하며 후방산란, 전방산란

및 측방산란에 의한 영향이 포함된다. 후방산란 함수의 경우 많은 실험을 통해 자료가 측정되어 있으나,^[1] 이에 비해 양상태 또는 3차원 산란에 관한 실험은 상대적으로 미비한 상태로 현재까지 입사각에 해당되는 반사각 부근의 전방산란은 강하고, 그 이외의 산란각에서는 약하다는 정도만이 알려져 있으며 고주파수에 대한 연구에 국한되어 있다.^[2,4] 이러한 조건 하에서 관측된 후방산란 강도를 이용하여 3차원 산란 함수를 외삽하는 방법이 시도된 바 있다.^[5] 이 경우 산란 함수로 람베르트 공식과 반사각 부근의 산란 공식을 가우시안 분포 형태로 결합시켜 주파수 및 입사각에 대해 독립적이지만 람베르트 상수 μ 를 조정하여 해저면 특성을 반영할 수 있으며, 산

[†]Corresponding author: Sungho Cho (shcho@kiost.ac)
Department of Maritime Security Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan 426-744, Republic of Korea

(Tel: 82-31-400-6197, Fax: 82-31-408-5828)

"이 논문은 2014년 한국음향학회 춘계학술대회에서 발표하였던 논문입니다."

란에 대한 통계적 특성이 기하학적으로 반영되어 실용적이며 적용이 쉽다는 장점이 있다. 또한 고주파수 (10-100 kHz)에서 사용하는 산란함수 중 하나인 합성 거칠기 모델을 저주파수에서 적용한 경우도 있다.^[6]

기존의 잔향음을 계산하기 위한 음향모델은 음선 이론을 적용한 RASP model,^[7] GSM^[8] 등이 있고, 국내의 경우 대륙붕에서의 거리독립 및 종속환경에 대해 산란함수들을 적용한 단상태 잔향음을 개발하였으며 기존 음선모델에 다항식 근사법을 이용하여 해지면 잔향음 모델이 있다.^[9,10] 음선이론 모델의 경우, 상대적으로 고주파수에 적합하며 해지면 내의 지음향 특성을 반영하기 어렵다는 단점이 있다. 그러므로 천해에서 저주파수 잔향음을 예측하기 위하여 정상모드이론과 포물선 방정식을 이용한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다.^[11,12]

정상모드 이론을 이용한 경계면 잔향음을 계산하기 위해서는 산란체에 대한 왕복 도달 시간 및 모드별 산란함수의 적용을 위해 다음과 같은 방법을 적용할 수 있다. 첫 번째로 도달시간의 경우 음원과 산란체, 산란체와 수신기 사이의 모드별 군속도를 계산하는 방법과 음원에서의 광대역 신호에 대한 응답 특성을 이용하여 푸리에 합성을 통해 계산할 수 있다.^[13] 두 번째로 경계면에서의 산란함수는 음원에 의한 파수와 경계면에서의 음속 및 모드별 파수를 이용하여 음선이론과 유사한 방법으로 음원에서 산란체까지의 입사각, 산란체에서 수신기까지의 산란각을 이용하여 계산 가능하다.

본 논문은 정상모드 방법을 이용한 천해 잔향음 모델을 제안한다. 정상모드 방법을 이용하여 음원과 산란체 및 산란체와 수신기 사이의 음파 전달을 계산하며, 산란체에 입사되어 산란되는 산란강도는 정상모드에서의 수평 파수를 이용하여 입사 및 산란각을 산출하여 고려하였다. 또한 제안한 모델을 검증하기 위해 표준화된 환경에서의 잔향음을 계산한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안한 알고리즘에 대해 기술하며, III장에서는 제안된 알고리즘을 이용하여 단상태 및 양상태 잔향음 표준문제에 적용하여 기존에 제시된 잔향음 모델과 비교하여 그 성능을 검증한다. 마지막으로 IV에서 본 논문의 결론을 요약한다.

II. 정상모드 잔향음 알고리즘

정상 모드를 이용한 잔향음 모델 개발에 대한 기본적인 개념은 1968년 Bucker와 Morris^[14]에 의해 처음으로 제안 되었으며, 이러한 개념은 1987년 Zhang과 Jin^[15]에 의해 더욱 발전되었다. 그러나 정상모드를 이용한 잔향음 모델의 경우, 시간 종속성과 산란 함수의 고려가 용이치 않다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 Ellis와 Crowe^[5]의 3차원 산란함수를 이용하였으며, 또한 기존의 잔향음 문제를 적용, 기존의 모델과 비교하여 성능을 검증하였다.

2.1 잔향음 계산 알고리즘

정상모드 이론을 이용하여 잔향음을 계산하기 위해서는 음원에서 산란체 사이의 전달손실, 산란체에서 수신기 사이의 전달손실 및 산란체에 입사되는 각도와 산란되는 각도에 따른 산란강도를 고려해야 한다. 음원에서 산란체 사이의 전달손실과 산란체에서 수신기 사이의 전달손실은 다음과 같이 정상모드의 음압 계산식으로 표현된다.

$$P_{inc}(r_s, \omega) = \frac{i}{4\rho(z_s)} \sum_{m=1}^M Z_m(z_s) Z_m(z_b) H_0^{(1)}(k_{r_m} r_s), \quad (1)$$

$$P_{scat}(r_r, \omega) = \frac{i}{4\rho(z_r)} \sum_{n=1}^N Z_n(z_r) Z_n(z_b) H_0^{(1)}(k_{r_n} r_r), \quad (2)$$

여기서 P_{inc} 는 음원에서 해지면 산란체까지의 음압, P_{scat} 는 산란체로부터 수신기에 도달되는 음압을 나타낸다. z 는 해수면으로부터의 수심, $k_{r_m, n}$ 은 수평 파수, $r_{s, r}$ 은 음원에서 산란체, 산란체에서 수신기까지의 수평거리, M, N 은 음속구조에 의한 총 모드수, $Z_{m, n}$ 은 수심별 모드함수, $H_0^{(1)}(k_{r_m, n} r_{s, r})$ 은 제 1종 영차 한켈 함수이다.

음선이론은 입사되는 음선과 반사 또는 산란되는 음선이 구분되지만 모드이론에서는 경계면에서의 입사와 산란을 표현할 수 없다. 그러나 경계면 부근

에서의 모드 형태와 모드의 미분을 이용한 WKBJ 방법을 이용하여 입사와 산란을 고려할 수 있다. 이를 근거로 Eqs.(1)과 (2)에 해저면에 의한 입사 및 산란에 의한 효과를 고려하기 위해서는 모드함수를 WKBJ 방법을 이용하여 해저면에서의 모드에 대해 입사되는 성분과 산란되는 성분으로 분리하여 표현해야 한다. 이를 위해 모드 함수에 대해 다음 식과 같은 미분 및 근사법을 적용하였다.^[16]

$$Z_m^+(z_b) = -\frac{i}{2k_{zm}(z)} \frac{\partial Z_m(z)}{\partial z} \Big|_{z=z_b} + \left[\frac{1}{2} - \frac{i\partial k_{zm}(z)/\partial z|_{z=z_b}}{4k_{zm}(z)} \right] Z_m(z), \quad (3)$$

$$Z_m^-(z_b) = -\frac{i}{2k_{zm}(z)} \frac{\partial Z_m(z)}{\partial z} \Big|_{z=z_b} + \left[\frac{1}{2} + \frac{i\partial k_{zm}(z)/\partial z|_{z=z_b}}{4k_{zm}(z)} \right] Z_m(z), \quad (4)$$

여기서 $Z_m^+(z_b)$ 는 해저면으로 입사되는 m번째 모드 함수, $Z_m^-(z_b)$ 는 해저면에서 산란되는 m번째 모드 함수이며, k_{zm} 은 수직 파수이다. 따라서 수층에서의 음속구조에 따라 계산된 모드에 Eqs.(3)과 (4)를 적용하여 입사 및 산란에 의한 효과를 표현할 수 있다. 천해에서 수심별 음속이 동일한 경우 또는 음속의 기울기가 약한 경우 위의 식에서 수직방향 파수의 미분은 0으로 수렴하므로 Eqs.(3)과 (4)의 두번째 항의 미분식이 정리되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_m^\pm(z_b) = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{1}{ik_{zm}(z)} \frac{\partial}{\partial z} \right) Z_m(z) \Big|_{z=z_b}, \quad (5)$$

상기의 식으로부터 해저면에 의한 잔향음식을 산출하기 위해 산란강도식을 적용하여 Eqs.(1)과 (2)를 합치고 Eq.(5)를 대입하면 다음 식과 같다.

$$P_{rcv}(r_s, r_r, \omega) = \frac{-1}{16\rho(z_s)\rho(z_r)} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N Z_m(z_s) Z_m^+(z_b) H_0^{(1)}(k_{rm} r_s) \times |S_{mn}| Z_n^-(z_r) Z_n^-(z_b) H_0^{(1)}(k_{rn} r_r) A, \quad (6)$$

여기서 S_{mn} 은 해저면 특성 및 모드별 파수에 의한 입사각 및 산란각이 고려된 산란강도 함수이며, A 는 거리에 따른 산란면적이다.

2.2 3차원 산란 모델

Fig 1은 3차원 양상태 잔향음 계산을 위한 음파의 산란을 형상화한 모식도이다. I_0 는 음원의 송신음압이며, $R(t)$ 는 수신된 잔향음을 나타낸다. 3차원 양상태 산란은 θ_p (수평입사각), θ_q (수평산란각), ϕ (방위각) 및 A (산란면적)에 의해 결정된다. 여기서 거울면 반사인 경우 $\theta_p = \theta_q$, $\phi = 0$ 이며 후방 산란인 경우 $\theta_p = \theta_q$, $\phi = \pi$ 가 된다. 따라서 음원과 수신기가 동일한 위치에 있는 단상태인 경우 산란강도는 $\phi = \pi$ 를 기준으로 수평입사각과 수평산란각에 의해 결정되며, 음원과 수신기가 분리된 양상태인 경우 산란강도는 방위각, 수평입사각 및 수평산란각에 의해 산출된다.

본 논문에서는 저주파수 대역에서 주로 사용하는 기존의 산란강도 식인 람베르트 공식과 이를 Kirchhoff 근사법과 결합한 산란강도식을 이용하였으며 식은 다음과 같다.^[5]

$$S(\theta_p, \theta_q, \phi) = \mu \sin\theta_p \sin\theta_q + \nu(1 + \Delta\Omega)^2 \times e^{-(\Delta\Omega/2\sigma^2)}, \quad (7)$$

$$\Delta\Omega = (\cos^2\theta_p + \cos^2\theta_q - 2\cos\theta_p \cos\theta_q \cos\phi) / (\sin\theta_p + \sin\theta_q)^2, \quad (8)$$

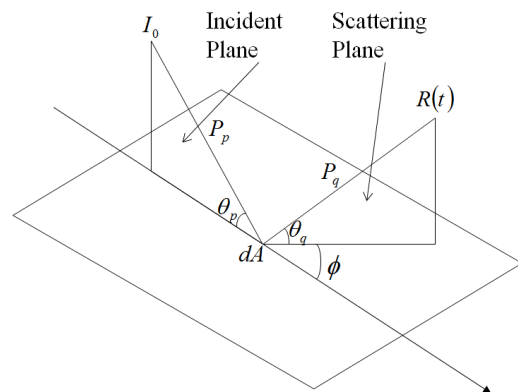


Fig. 1. Scattering Geometry for calculating the bistatic reverberation.

Eq.(7)의 첫번째 항은 일반적으로 낮은 수평입사각에 대한 해저면 산란을 고려할 때 사용되는 람베르트 공식으로 입사각, 산란각, 상수 μ 로 표현되며, 두번째 항은 2차원의 등방성 거칠기와 실효치 기울기 σ 를 갖는 평면으로부터 산란되는 음파의 Kirchhoff 근사법으로 유도된 산란함수로서 거울면 반사($\Delta\Omega=0$) 방향에서 가장 강한 산란값 ν 를 가지며, 거울면 반사각을 벗어나는 각도에서는 경계면으로부터의 산란각과 방위각에 대한 가우시안 형태의 3차원 산란함수 형태를 갖는다. Eq.(8)은 경계면에 특정 각도로 입사된 음파로부터 산란각 및 방위각에 대한 3차원의 파수 성분의 기하학적 크기를 나타낸다.^[17]

$$B(\theta_p, \theta_{pr}, \phi) = \mu \sin^2 \theta_p + \nu (\sin \theta_p)^{-4} \times e^{-(\cos^2 \theta_p / 2\sigma^2)} \quad (9)$$

Eq.(7)에서 후방산란의 경우 Eq.(9)와 같이 정리되며, Ellis와 Crowe^[5]는 Eq.(9)에 대한 외삽의 형태로 분리 및 반각 근사법을 적용하여 전방산란을 고려 가능한 식을 기술하였다. 여기서 분리 근사법은 Eq.(9)에서 후방산란 강도를 입사각과 산란각을 나누어 계산하여 두 개의 산란강도 곱의 근을 취한 산란함수이며, 반각 근사법은 입사각과 산란각의 평균각도에 대한 산란함수이다.

천해에서 저주파수에 의한 원거리 해저면 잔향음 성분은 임계각 이하로 수평입사되는 음파에 의해 대부분 영향을 받으며, 임계각 이상의 각도는 해저면

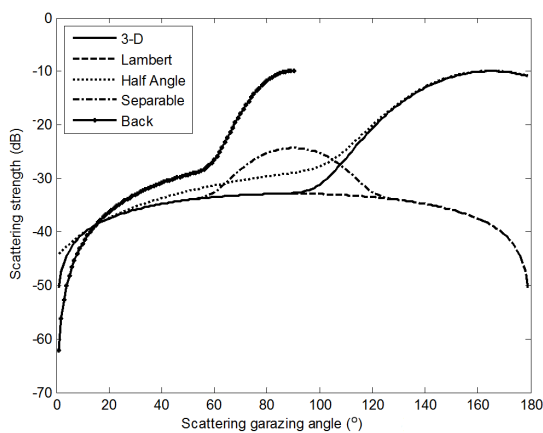


Fig. 2. Comparison of scattering functions at $\theta_p = 15^\circ$ using $10 \log \mu = -27 \text{ dB}$, $10 \log \nu = -10 \text{ dB}$, and $\sigma = 10^\circ$.

반사 손실 및 투과 손실에 의해 원거리까지 전파되지 않는다. Fig. 2는 송신기와 수신기가 동일한 평면에 존재할 때 Ellis와 Crowe^[5]가 제안한 다양한 산란함수에 대한 산란강도의 차이를 나타낸 것으로 해저면 산란함수들에 대해 입사각이 15° 인 경우에 대한 산란각도별 산란강도를 비교한 것이다. 수평입사각 15° 에 대해 산란각 90° 까지는 방위각이 180° 인 경우이며, 산란각이 90° 이상에서는 방위각이 0° 인 경우를 나타낸다. 모든 산란함수에서 입사각과 동일한 후방 산란각에서 일치하는 산란강도를 가지며, 본 연구에서 적용한 3-D 산란공식은 60° 미만의 후방산란 영역에서는 람베르트 및 분리 근사법과 120° 이상의 전방산란 영역에서 반각 근사법과 동일한 산란강도를 나타냈다.

III. 잔향음 알고리즘 검증

3.1 단상태 잔향음

천해역에서 잔향음 알고리즘 검증을 위한 음향도 파관의 환경은 미국 ONR 주관으로 수행된 RMWI의 XI번 문제^[18]에 대해 제시된 잔향음 결과와 비교하였다. RMWI의 XI번 문제는 수심 100m인 거리독립환경에서 3차원의 단상태 해저면 잔향음을 람베르트

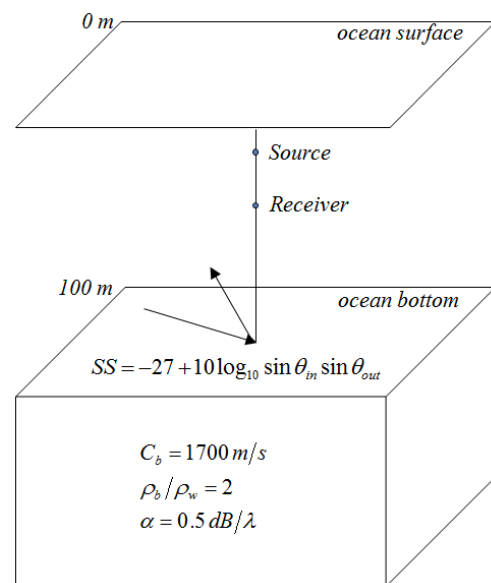


Fig. 3. Geometry for reverberation workshop problem XI.

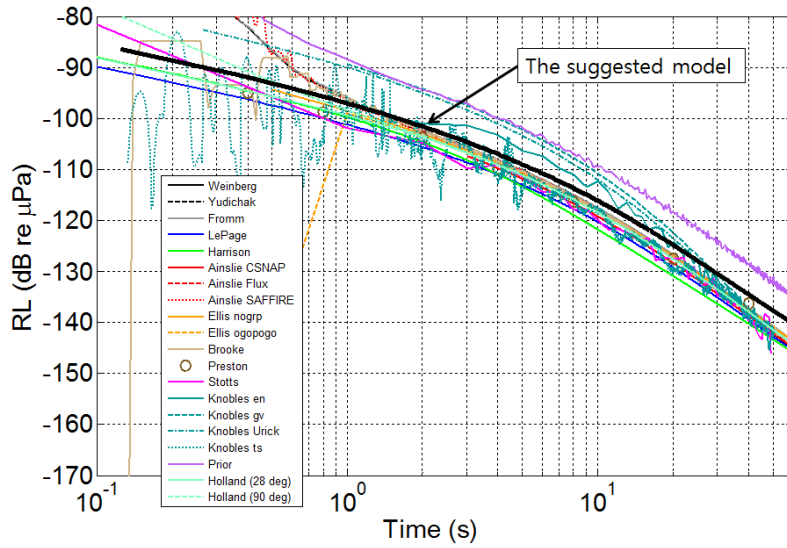


Fig. 4. Reverberation levels vs. time for workshop problem XI (250 Hz). The plot shows 15 independent solutions and the suggested model (bold black line).

Table 1. Input Parameters for RMW I problem XI.

| | | |
|--------------|----------------|------------------------|
| water column | source depth | 30 m |
| | receiver depth | 50 m |
| | density | 1024 kg/m ³ |
| | sound speed | 1500 m/s |
| sea bed | density | 2048 kg/m ³ |
| | sound speed | 1700 m/s |
| | attenuation | 0.5 dB/λ |

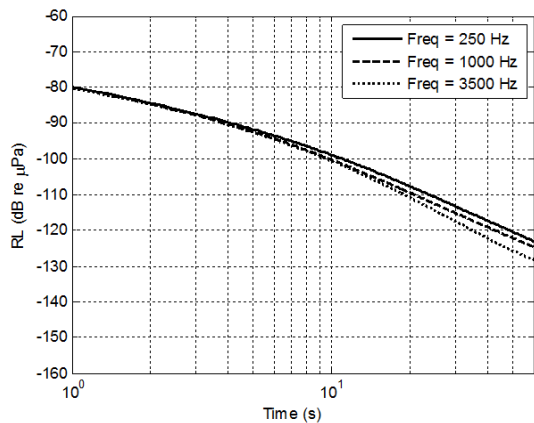


Fig. 5. Reverberation levels vs. time for workshop problem XI at three frequencies (250, 1000, 3500 Hz).

공식을 적용하여 계산하는 조건이다. 음원의 주파수는 250 Hz이며, 거리는 약 75 km, 시계열 신호는 100 s 까지 계산하였다. 음원과 수신기의 수심, 수층 및 해저면에 대한 조건은 Fig. 3과 Table 1과 같다.

Fig. 4는 RMWI의 XI번 문제에 대해 제시된 20가지의 잔향음 모델의 계산결과와 본 논문의 잔향음 계산 알고리즘에 의한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 제시된 기존의 결과와 본 논문의 잔향음 계산 알고리즘에 의한 결과는 기존 모델들의 결과와 비교할 때, 모델간의 차이가 나타나는 범위내에서 유사하다고 할 수 있으며, 기존의 결과중 Reference [18]의 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다. Reference [18]의 결과는 본 논문과 동일한 정상모드 이론에 의한 모델을 사용한 것이다.

RMWI의 XI번 문제에서 정의한 중심주파수 및 주파수 대역폭에 따라 음원의 초기 에너지차이가 나타나므로 Fig. 5에서는 XI번 문제에 대해 음원의 에너지 값을 일치시켜 주파수 250, 1000, 3500 Hz에 대한 잔향음을 나타낸 것이다. 계산 결과 주파수가 증가함에 따라 시간에 따른 잔향음의 준위는 감소하는 형태로 나타났으며 그 이유는 적용한 산란함수인 람베르트 식은 주파수에 영향을 받지 않으므로 주파수에 따른 전달손실의 차이에 의한 것이다.

3.2 양상태 잔향음

양상태 잔향음은 음원과 수신기가 공간적으로 분리된 상태에서 시간에 따라 수신되는 음압준위를 나타내며, 전방 산란구간과 후방산란 구역에서 반사

및 산란되는 음파를 고려하였다. 양상태 잔향음에 대한 검증은 RMWI의 XI번 문제의 기본 조건인 수층 음속과 해저면에 대한 정보는 동일하며 음원과 수신기가 수평적으로 10 km 이격된 양상태 잔향음을 계산하는 기준문제 XV(Fig. 6)에 대하여 기존 연구 결과와 비교하였다. 기준문제 XV은 해저면에 대하여 램베르트 공식 적용을 기준으로 하고 있으나, 램베

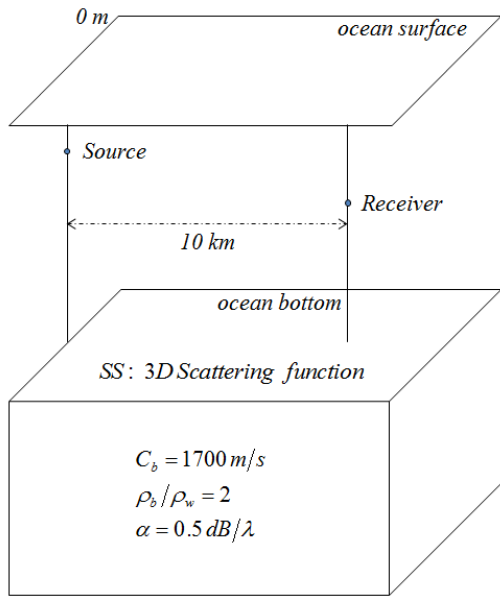


Fig. 6. Geometry for reverberation workshop problem XV.

르트 공식은 Fig. 2에서 전방산란 구간에서도 후방산란 영역에서의 산란강도 값과 동일하게 계산되므로 본 논문에서는 전방산란 구간에서는 위에서 기술한 3차원 산란함수를 이용하였다.

Fig. 7은 거리독립 환경에서 음원과 수신기가 분리된 RMWI의 XV 문제에 대해 양상태 잔향음 모델을 적용한 기존의 결과와 본 논문의 결과를 동시에 나타낸 것이다. 수신기가 음원으로부터 10 km 이격되어 있으며 수심 100 m의 평탄한 해저면과 1500 m/s의 일정한 음속 환경이므로 수신기에 수신되는 잔향음은 최초 약 6.7s에서 음원과 수신기 사이의 전방산란에 의한 효과가 나타나며 약 6.7s 이후에는 수신기 이후 거리에서의 해저면 후방산란에 의한 잔향음이 수신된다. Yudichak와 Goddard^[18]의 결과를 제외하 나머지 잔향음 모델은 강한 전방산란 효과가 약 6.7s 부근에 나타나며 후방산란에 의한 잔향음 준위는 전방산란 구간에 비해 30 dB 정도 약하게 나타난다. Fig. 7에서 굵은 실선은 제안한 정상모드 잔향음 알고리즘으로 계산된 양상태 잔향음 준위로 기존의 잔향음 모델과 거의 일치하는 결과를 확인하였다. 동일한 정상모드 모델을 사용하는 Reference [18]의 결과와 근소하게 차이가 나는 이유는 같은 이론에 의한 음향모델이라도 수치적으로 구현하는 방법의 차이에 의해 모드 및 파수 등의 계산 방법이 다르기 때

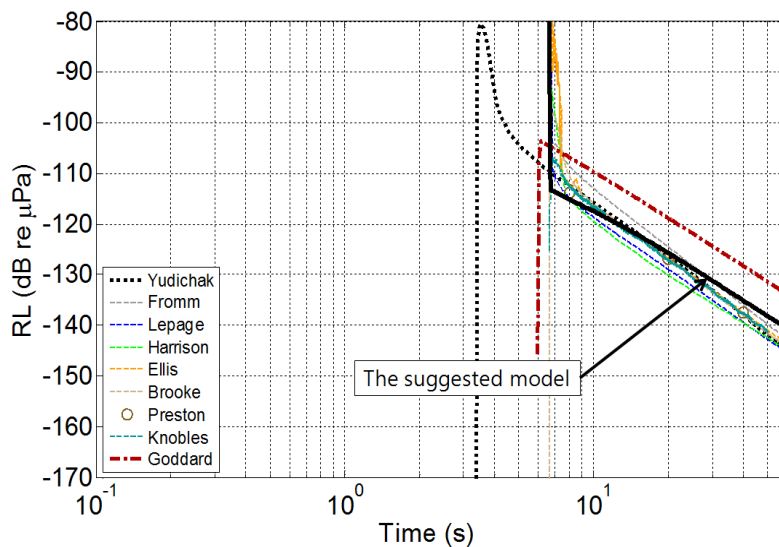


Fig. 7. Reverberation levels vs. time for workshop problem XV (250 Hz). The plot shows 9 independent solutions and the suggested model (bold black line).

문이다. 또한 RMW I의 XV문제에서 제시한 산란함수를 적용하는 경우 음원과 수신기 사이에 형성되는 산란단면적을 고려하는 방법의 차이에 의한 것으로 판단된다.

IV. 요약

본 논문에서는 거리독립 해양환경에서 정상모드를 이용하여 단상태 및 양상태 잔향음을 계산하는 알고리즘을 제시하였으며, 정상모드 이론에 따라 계산된 모드별 파수에 따른 입사각 및 산란각을 고려한 산란강도를 수치적으로 적용하여 해저면 특성에 따른 잔향음을 계산한다. 제시한 알고리즘은 RMW I의 XI, XV번 문제에서 제시된 기존의 잔향음 모델과 상대 비교를 수행하여 유사한 결과를 산출하였다. 천해에서 저주파수 잔향음은 해저면에 의한 반사손실로 인해 낮은 입사각 및 산란각에 의한 영향이 지배적이다. 송·수신기가 동일한 평면에 위치하는 단상태 잔향음의 경우 입사각 및 후방 산란각은 약 1° ~ 27° 사이에서 형성이 되며 Fig. 2에 나타난 바와 같이 산란함수간의 차이는 높은 수평산란각도에 비해 상대적으로 크지 않다. 반면 양상태 잔향음의 경우 반사각 주변을 포함하는 전방산란 강도가 30 dB 이상의 차이를 보이며 최초 도달하는 잔향음 준위에 큰 영향을 주는 것으로 해석된다. 저주파수 잔향음은 3차원으로 원거리까지 영향을 받기 때문에 3차원 산란 및 전달을 고려해야 한다. 거리독립 해양환경의 경우 정상모드 이론은 음원 위치에서의 모드만을 이용하는 것이 가능하지만 거리종속 해양환경에서는 위치별 모드를 계산하여 합성해야 한다. 따라서 저주파수 광대역 잔향음 계산 및 3차원 거리 종속 해양 환경에 대한 알고리즘의 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원에서 실시한 “천해 지질환경과 음파전달 환경과의 상호 연계 연구(PE98978)”와 “남서해 천해역 퇴적층 지음향 특성연구(PE99331)” 과제에 의해 수행되었습니다.

References

1. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound* (McGraw-Hill, New York, 1983), pp 237-290.
2. D. R. Jackson and K. B. Briggs, “High-frequency bottom scattering: Roughness versus sediment volume scattering,” *J. Acoust. Soc. Am.* **92**, 962-977 (1992).
3. J. W. Choi, J. Na, and W. Seong, “240-kHz Bistatic Bottom Scattering Measurements in Shallow Water, *IEEE J. Oceanic Eng.* **26**, 54-62 (2001).
4. K. L. Williams and D. R. Jackson, “Bistatic Bottom Scattering: Model, Experiments, and Model/Data Comparison,” *Applied Physics Laboratory, University of Washington, APL-UW Tech. Rep. 9602*, 1997.
5. D. D. Ellis and D. V. Crowe, “Bistatic reverberation calculations using a three-dimension scattering function,” *J. Acoust. Soc. Am.* **89**, 2207-2214 (1991).
6. M. T. Sundvik and S. M. Reilly, “Measurements of low grazing angle bottom backscatter at frequencies from 220 to 1000 Hz in the central Mediterranean Sea,” *J. Acoust. Soc. Am.* **92**, 2466 (1992).
7. E. R. Franchi, J. M. Griffin, and B. J. King, “NRL reverberation model: A computer program for the prediction and analysis of medium-to-long-range boundary reverberation,” *Naval Research Laboratory, Washington DC, Report 8721* (1984).
8. H. Weinberg, “The Generic SONAR model,” *Naval Underwater System Center, New London, CT, Technical Document 5971D* (1985).
9. K. Lee, Y. Chu, and W. Seong, “Geometrical ray-bundle reverberation modeling,” *J. Computational Acoustics*, **21**, 1350011-1~17(2013).
10. Y. Choo, W. Seong, and K. Lee, “Modeling and analysis of monostatic seafloor reverberation from bottom consisting of two slopes,” *J. Computational Acoustics*, **22**, 1450005-1~15 (2014).
11. T. C. Yang and T. J. Hayward, “Low-frequency arctic reverberation: II. modeling of long-range reverberation and comparison with data,” *J. Acoust. Soc. Am.* **93**, 2524-2534 (1993).
12. N. Kim, S. Oh, K.-S. Yoon, S. Lee, and J. Na, “Bi-static low-frequency reverberation model in shallow water,” *J. Acoust. Soc. Kr.* **22**, 472-481 (2003).
13. S. Oh, S. Cho, and D. Kang, “Low frequency reverberation modeling in shallow water using a normal-mode theory” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr. Suppl. 1(s)* **33**, 299-300 (2014).
14. H. P. Bucker and H. E. Morris, “Normal-mode reverberation in channels or ducts,” *J. Acoust. Soc. Am.* **44**, 827-828 (1968).
15. R. Zhang and G. Jin, “Normal-mode theory for the average reverberation intensity in shallow water,” *J. Sound Vib.* **119**, 215-223 (1987).
16. G. Duckworth, K. LePage, and T. Farrell, “Low-frequency long-range propagation and reverberation in the central

Arctic: Analysis of experimental results,” J. Acoust. Soc. Am. **110**, 747-760 (2001).

17. L. M. Brekhovskikh and Yu. P. Lysanov, *Fundermentals of Ocean Acoustics* (Springer-Verlag, New York, 1982), pp. 207-209.

18. *Office of Naval Research, Reverberation Modeling Workshop*, <http://www.onr.navy.mil/reports/FY09/oaperkin.pdf>, 2009.

저자 약력

▶ 오 선택 (Suntaek Oh)



1992년 2월: 한양대학교(이학사)
 1995년 2월: 한양대학교(이학석사)
 2003년 8월: 한양대학교(이학박사)
 2012년 ~ 현재: 한국해양과학기술원 해양 방위연구센터 연구원

▶ 조 성 호 (Sungho Cho)



2005년 2월: 한양대학교(이학사)
 2007년 2월: 한양대학교(이학석사)
 2012년 2월: 한양대학교(이학박사)
 2012년 ~ 현재: 한국해양과학기술원 해양 방위연구센터 연구원

▶ 강 돈 혁 (Donhyug Kang)



1992년 2월: 한양대학교(이학사)
 1994년 8월: 한양대학교(이학석사)
 2002년 2월: 한양대학교(이학박사)
 2002년 11월 ~ 2004년 10월: 일본 북해도 대학 특별연구원
 2005년 ~ 현재: 한국해양과학기술원 해양 방위연구센터 책임연구원

▶ 박 경 주 (Kyeongju Park)



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