

연성모드법 기반의 원거리 비상관 해지면 잔향음 모델

Long range incoherent seafloor reverberation model based on coupled normal mode method

박중용, 추영민,* 이근화,** 성우제*†

(Jungyong Park, Youngmin Choo,* Keunhwa Lee,** and Woojae Seong†)

서울대학교 조선해양공학과, *서울대학교 조선해양공학과/해양시스템공학연구소, **세종대학교 국방시스템공학과
(Received March 12, 2016; revised May 9, 2016; accepted July 7, 2016)

초 록: 본 논문에서는 연성 모드 기반의 양상태 비상관 잔향음 모델을 제안한다. 거리종속 환경에서 단방향 연성 모드 기반의 음파전달모델을 사용하여 음원에서 산란체에 도달하는 음압과 산란체에서 수신원에 도달하는 음압을 계산한다. 계산의 편의 상 각 산란체와 음원 또는 수신기 사이의 음파전달은 산란체와 음원 또는 수신기를 잇는 2차원 평면에서만 일어난다고 가정한다. 모델의 타당성을 검증하기 위해, 미 해군 잔향음 모델링 워크숍 I, II에 제시된 문제에 대해 계산하고, 그 결과를 음선 이론 기반의 비상관 잔향음 결과와 비교했다.

핵심용어: 양상태 비상관 잔향음, 연성모드법, 거리 종속 환경

ABSTRACT: In this paper, the incoherent reverberation model based on coupled normal mode method is presented. In the range dependent environment, one way coupled normal mode method is used to calculate the pressure from a source to a scatterer patch and the pressure from a scatterer patch to a receiver. For the computational efficiency, the sound propagation from a source/receiver to the scatterer patch is assumed to occur only in the 2D plane where a source/receiver and scatterer patch are located. For the model verification, problems of the reverberation modeling workshop I and II sponsored by the US office of Naval Research are calculated and the results are compared with the incoherent reverberation model results based on the ray method.

Keywords: Bistatic incoherent reverberation, Coupled normal mode method, Range dependent environment

PACS numbers: 43.30.Gv, 43.30.Vh

1. 서 론

수중음향학에서의 잔향음은 송신된 음파가 해수면, 해저 지형의 거친 경계면, 체적의 불균질한 특성에 의해 산란되는 신호의 합을 의미한다. 기존의 연구에서는 보통 해양 환경을 거리 독립으로 가정한 단상태 잔향음에 대한 연구가 진행되었으나, 최근 거리 종속 해저 지형을 고려한 양상태 잔향음에 관련된 연구가 발표되고 있으며,^[1] 비선형 내부파가 존

재하는 거리 종속 음속 환경에서의 단상태 잔향음에 대한 연구^[2] 등 거리 종속 환경에서의 잔향음에 대한 지속적으로 이루어지고 있다. 잔향음은 다양한 음파 전달모델을 이용하여 구현할 수 있는데, 기존의 연구에서는 해석적 방법^[3,4]을 이용하거나 음선 이론,^[5-7] 양방향 포물선 방정식법,^[8] 유한요소법,^[9] 정상모드법^[10-15]을 이용한 잔향음 모델이 제시되었다.

해석적 방법^[3,4]은 계산량이 적다는 장점이 있으나, 한정된 음속 구조 환경에 대해서만 계산이 가능하다는 단점이 있다.

음선 이론 기반의 잔향음^[5-7]은 고주파에서 계산이 용이하며, 거리 종속 환경에 대해서도 계산할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 음선 이론의 가정 상, 저주

†Corresponding author: Woojae Seong (wseong@snu.ac.kr)
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering/
RIMSE (Research Institute of Marine Systems Engineering),
Building 36, Room 304, Seoul National University, 1 Gwanak-ro,
Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea
(Tel: 82-2-880-8359, Fax: 82-2-888-9298)

파인 경우에 모든 해양환경에 대하여 전달손실의 정확도를 보장할 수 없고, 산란체의 위치가 음선이 집중되거나 지나지 않는 특이점의 경우에는 전달 손실을 정확하게 구하는데 어려움이 있다. 그리고 산란체가 원거리에 위치할수록 고유 음선의 개수가 많아져, 계산량이 크게 증가한다는 단점이 있다.

포물선 방정식법은 거리 종속 환경에 대해 계산이 가능한데다 계산된 음압의 정확도가 높다. 하지만 입사음장과 산란음장을 분리하여 계산하지 못하고 입사각과 산란각을 추정할 수가 없어, 산란함수를 이용하는 일반적인 방법을 이용하여 잔향음을 계산하지 못한다. 따라서 산란함수에 이용된 해저면 거칠기 스펙트럼을 이용하여 해저면을 여러 번 형성한 뒤, 양방향 포물선 방정식법을 이용하여 각 해저면에 대해 직접 계산하여 구한 산란 음장을 평균하는 몬테카를로 방식을 이용한다.^[8] 양방향 포물선 방정식법을 이용하여 구한 잔향음의 경우, 생성한 해저면의 거칠기를 모의하기 위해 작은 격자를 사용해야 하고, 여러 번 해저면을 형성하여 각각의 경우에 대해 계산해야 하기 때문에 계산량이 크다는 단점이 있다.

유한요소법^[9]을 이용하는 경우, 다른 가정 없이 헬름홀츠 방정식을 직접 풀기 때문에 어떠한 환경에 대해서도 계산이 가능하다는 장점이 있으나, 계산공간을 이산화할 때 많은 격자가 필요하여 계산량이 크다는 단점이 있다.

정상모드법 기반의 잔향음^[10-16]의 경우, 거리에 따른 전달손실의 신뢰성이 음선 기법에 비하여 높다는 장점이 있지만, 여러 가정들을 이용하여 시간 종속성을 처리해야 한다는 어려움이 있다. 대부분의 정상모드법 기반 잔향음 연구는 거리 독립 환경에 국한되어 있는데, 약한 거리 종속 환경에 대하여 단열성 모드법^[15]을 음파전달모델로 이용한 경우도 있다. 단열성 모드법은 모드 간의 연성이 작은 경우에만 쓰일 수 있으며, 그렇지 않은 경우에 대하여는 정확하지 않다. 따라서 거리에 따라 급격한 변화가 발생하는 환경에 대해서는 연성모드법을 이용해야 한다. 기존 연성모드법 기반의 잔향음 연구로는 잔향음의 세부적인 패턴에 초점을 맞추고, 음원의 밴드 폭과 같은 능동 소나 체계의 특성을 고려한 상관 잔향음

모델^[16]이 개발되었다.

본 연구에서는 거리 종속 환경에서 시간에 대한 잔향음의 경향을 파악하는데 초점을 맞추어, 연성모드법 기반의 해저면 양상태 비상관 잔향음 모델을 제시하였다. 산란체에 해당되는 미소면적과 음원/수신기 사이의 전달 손실은 단방향 연성모드법을 이용하여 구하였다. 이 때 산란체와 음원/수신기 사이를 잇는 2차원 평면에서만 음파가 전달된다고 가정하여 3차원 전파 효과는 무시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 비상관 잔향음 계산 알고리즘에 대해 소개하였다. III장에서는 음선 기반의 비상관 잔향음 모델과의 비교를 통해 제안된 모델의 타당성을 확인하고 IV장에서는 결론을 요약하여 제시한다.

II. 잔향음 계산 알고리즘

본 연구에서는 거리 종속 환경을 고려하기 위하여 단방향 연성모드법을 음파전달 모델로 이용하였는데, 이는 급격한 환경 변화에서도 단열성 모드법에 비해 옳은 값을 주기 때문이다. 2.1절에서는 음파전달 모델인 단방향 연성모드법에 대해 소개하고, 2.2절에서는 이를 활용한 잔향음 알고리즘에 대해 소개한다.

2.1 단방향 연성모드법

연성모드법은 거리 종속 환경을 여러 구간의 거리 독립환경으로 나누고, 각 구간의 거리 방향 경계면에서의 음압과 거리방향 입자 속도의 연속성을 고려하여 거리 종속 환경의 음파전달을 구하는 방법으로 구간 사이의 경계조건을 계산하기 위하여 거리 독립 정상모드법을 각 구간마다 계산할 필요가 있다. 연성모드법 계산 방법의 종류로는 경계면에서 전방산란과 후방산란을 모두 고려하는 양방향 연성모드법^[17]과 단일 산란체 가정을 적용하여 후방 산란의 영향을 무시한 단방향 연성모드법^[18]이 있다. 본 논문에서는 단방향 연성모드법을 이용하였는데, 그 이유는 원거리에서는 후방산란의 영향이 미미하여 두 방법의 차이가 거의 없으며 양방향 연성모드법과 달리 역행렬 계산이 없어 계산 효율이 좋기 때문이다. 잔향

음 계산 시 전달 손실을 계산할 때 사용하는 원통 좌표계에서 단방향 연성모드법을 아래에서 소개하겠다.

먼저 거리 종속 환경을 여러 개의 거리 독립 환경으로 나누었을 때, j번째 구간에 속하는 거리 r은 다음과 같이 $r \in (r_{j-1}, r_j)$ 로 정의할 수 있다. 이 때 j번째 구간에서 단방향 연성모드법을 이용하여 구한 음압 $p^{(j)}(r, z)$ 은 거리 r과 깊이 z의 함수로, 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$p^{(j)}(r, z) \approx \frac{1}{\sqrt{r}} \sum_n A_n^{(j)} \phi_n^{(j)}(z) \exp[ik_n^{(j)}(r - r_{j-1})]. \quad (1)$$

이때 $\phi_n^{(j)}$ 는 j번째 구간에서의 n번째 모드 함수이며, $k_n^{(j)}$ 은 j번째 구간에서 n번째 고유값이며 물리적인 의미는 거리 방향의 파수이다. $A_n^{(j)}$ 는 j번째 구간의 n번째 모드 성분에 해당하는 음원 계수로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A_n^{(j+1)} \approx \sum_m C_{nm}^{(j)} A_m^{(j)} \exp[ik_n^{(j)}(r_j - r_{j-1})]. \quad (2)$$

첫 번째 구간에서의 m번째 모드 성분에 해당되는 음원 계수 $A_m^{(1)}$ 는 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.

$$A_m^{(1)} = \sqrt{\frac{2\pi i}{k_m}} \frac{\phi_m^{(1)}(z_s)}{\rho^{(1)}(z_s)}. \quad (3)$$

이때 $\phi_n^{(1)}(z_s)$ 은 음원이 속한 구간에서 음원 위치에서의 모드 함수, $\rho^{(1)}(z_s)$ 는 음원 위치에서의 밀도를 나타낸다.

$C_{nm}^{(j)}$ 는 j번째 구간과 j+1번째 구간 경계면에서의 정상 모드 간의 연성 행렬을 나타내는 값으로, 아래와 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$C_{nm}^{(j)} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{\phi_n^{(j+1)}(z) \phi_m^{(j)}(z)}{\rho^{(j+1)}(z)} dz + \frac{1}{2} \frac{k_m^{(j)}}{k_n^{(j+1)}} \int_0^\infty \frac{\phi_n^{(j+1)}(z) \phi_m^{(j)}(z)}{\rho^{(j)}(z)} dz. \quad (4)$$

이때 위 식의 첫 번째 항은 경계면에서의 음압 연속 조건을 나타내며 두 번째 항은 경계면에서 입자의 거리 방향 속도의 연속 조건을 나타낸다. 이 때 $\rho^{(j)}(z)$ 는 j번째 구간에서 밀도를 깊이 z에 따른 함수로 표현하였다.

2.2 잔향음 알고리즘

본 논문에서는 2.1절에서 다룬 단방향 연성모드법을 이용하여 비상관 잔향음 모델을 제시하였다. 단상태와 양상태 잔향음인 경우에도 모두 적용이 가능하다. 이 때, 시간의 함수로 표현되는 비상관 잔향음 $RL(t)$ 은 아래의 식과 같이 산란체에 들어오는 잔향음과 음원의 영향을 모든 산란체에 대해 적분하여 구하였다. 이 때, 산란체는 해저 경계면을 의미한다.

$$RL(t) = \int I_0(t) |P_{rev}(t)|^2 dA. \quad (5)$$

$I_0(t)$ 는 음원에서 방출되는 신호의 제공 값을 나타낸다. $P_{rev}(t)$ 는 산란체에 의해 발생하는 잔향음을 의미하며 그 크기는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P_{rev} = \sum_m \sum_n P_m^{inc} \times \sqrt{S_{m,n}} \times P_n^{scatt}. \quad (6)$$

P_m^{inc} 는 입사 음압을 구성하는 정상모드값 중 m번째 모드 성분이고, P_n^{scatt} 는 산란 음압을 구성하는 정상모드값 중 n번째 모드 성분이다. $S_{m,n}$ 는 m번째 모드와 n번째 모드에 해당되는 접지 각에 대한 산란함수를 의미한다. 비상관 잔향음의 경우, $|P_{rev}|^2$ 의 값은 교차항의 평균이 0이라는 가정 아래에서 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$|P_{rev}|^2 = \sum_m \sum_n |P_m^{inc}|^2 \times |S_{m,n}| \times |P_n^{scatt}|^2. \quad (7)$$

산란 함수의 크기를 구할 때, m번째 모드가 산란체에 입사하거나 산란되는 접지 각이 필요하다. 이 각은 m번째 모드의 위상속도 c_m 와 산란체 깊이에서의 음속 c_{bottom} 을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

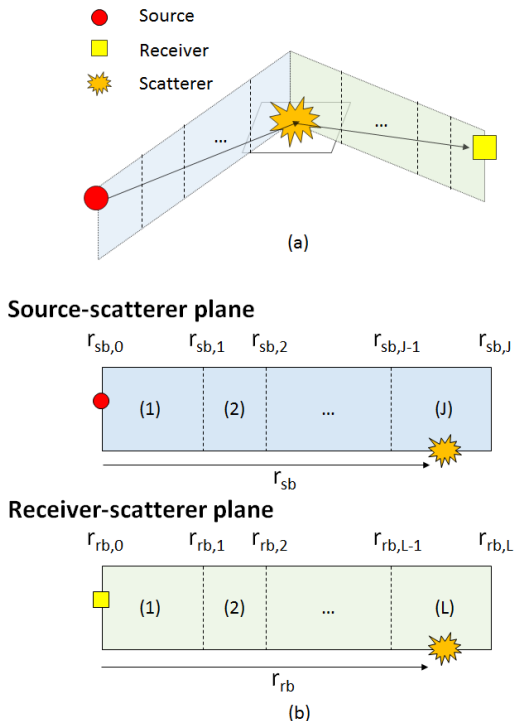


Fig. 1. Schematic view of the range dependent reverberation environment. (a) The source, receiver and the scatterer locations. (b) the source-scatterer plane and receiver-scatterer plane.

$$\cos \theta_m = \frac{k_m}{k_{\text{bottom}}} = \frac{c_{\text{bottom}}}{c_m}. \quad (8)$$

Fig. 1(a)를 통해 거리 종속 해양 환경에서 음원, 산란체, 수신기의 위치를 확인할 수 있다. 본 연구의 잔향음은 2차원 음파전달모델을 활용하기 때문에, 음원-산란체를 포함하는 평면과 수신기-산란체를 포함하는 평면으로 나누고, 각각의 평면에 대해 음파 전달 모델을 활용하여 음압을 구한다. Fig. 1(b)처럼 음원과 산란체를 포함하는 평면은 J개의 거리 독립 구간으로 구성되어 있고, 산란체와 수신기를 포함하는 평면은 거리 구간을 L개의 거리 독립 구간으로 구성되어 있다고 가정할 때, 음원과 산란체가 존재하는 평면에서 산란체는 음원 기준 J번째 구간에 위치하며, 산란체와 수신기가 존재하는 평면에서 산란체는 수신기 기준 L번째 구간에 위치한다. 이러한 환경에서 음원에서 산란체까지의 거리를 r_{sb} , 산란체의 깊이를 z_b , 음압을 $P^{inc(J)}(r_{sb}, z_b)$ 라 하고 수신기에서 산란체까지의 거리를 r_{rb} , 음압을 $P^{scatt(L)}(r_{rb}, z_b)$ 이

라 할 때, 각 음압은 아래의 두 식과 같이 표기할 수 있다.

$$\begin{aligned} P^{inc(J)}(r_{sb}, z_b) &= \frac{1}{\sqrt{r_{sb}}} \sum_m A_m^{(J)} \phi_m^{+(J)} \exp[ik_m^{(J)}(r_{sb} - r_{sb, J-1})], \quad (9) \\ &= \sum_m P_m^{inc(J)}(r_{sb}, z_b), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P^{scatt(L)}(r_{rb}, z_b) &= \frac{1}{\sqrt{r_{rb}}} \sum_n A_n^{(L)} \phi_n^{-(L)} \exp[ik_n^{(L)}(r_{rb} - r_{rb, L-1})], \quad (10) \\ &= \sum_n P_n^{scatt(L)}(r_{rb}, z_b). \end{aligned}$$

이때 $r_{sb} \in (r_{sb, J-1}, r_{sb, J})$, $r_{rb} \in (r_{rb, L-1}, r_{rb, L})$ 이고, $P_m^{inc(J)}(r_{sb}, z_b)$ 는 음원 기준 J번째 구간에 속하는 산란체에 전달되는 입사 음압을 구성하는 정상모드값 중 m번째 모드 성분이며, $P_n^{scatt(L)}(r_{rb}, z_b)$ 는 수신기 기준 L번째 구간에 속하는 산란체에서 수신기로 전달되는 산란 음압을 구성하는 정상모드값 중 n번째 모드 성분을 의미한다.

산란체가 속한 구간의 정상모드함수는 경계면에서의 입사음장과 산란음장이 구분되지 않고 합으로 나타나지만, WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin) 방법을 이용하여 입사음장에 기여하는 부분과 산란음장에 기여하는 부분으로 모드함수를 근사하여 구분할 수 있다. 깊이에 대한 음속의 변화가 적어 깊이에 따른 수직방향 파수의 변화가 0에 가깝다고 가정할 때, 아래의 두 식을 이용하여 입사음장에 기여하는 모드함수와 산란음장에 기여하는 모드함수를 구할 수 있다.^[13]

$$\phi_m^{+(J)}(z_b) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{ik_{zm}^{(J)}} \frac{\partial}{\partial z} \right] \phi_m^{(J)}(z)|_{z=z_b}, \quad (11)$$

$$\phi_n^{-(L)}(z_b) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{ik_{zn}^{(L)}} \frac{\partial}{\partial z} \right] \phi_n^{(L)}(z)|_{z=z_b}, \quad (12)$$

이때 $k_{zm}^{(J)}$ 는 음원 기준 J번째 구간에서의 m번째 수직 방향 파수이며, $k_{zn}^{(L)}$ 는 수신기 기준 L번째 구간에서의 n번째 수직방향 파수이고, 해저 경계면에서 입사

음장을 구성하는 m번째 모드 함수를 $\phi_m^{+(J)}$, 해저 경계면에서 산란 음장을 구성하는 n번째 모드 함수를 $\phi_n^{-(L)}$ 로 표기한다.

경계면 산란 함수의 경우, 입사 음장과 산란 음장을 구별하였기 때문에 기존의 산란함수들을 그대로 이용할 수 있다. 기존의 산란함수들은 소경사 근사법, Lambert 법칙 등이 있는데, 계산 환경에 따라 필요한 산란 함수를 잔향음 모델에 적용할 수 있다. 소경사 근사법 기반의 산란함수는 주파수 의존적 특성을 지니고 있으며, 비슷한 계통인 섭동이론과 키르히호프 근사법에 비해 전 영역의 접지 각도에 대해 좋은 근사값을 제공한다는 장점이 있다. 한편, Lambert 법칙은 파라미터 개수가 적어 간편하게 사용할 수 있다는 장점이 있으며, 주파수 독립적인 특성을 지닌다.

다음은 본 모델에서 이용한 시간 종속성에 대하여 설명하겠다. 정상모드법 기반으로 하는 잔향음 모델에서 음파가 음원에서 산란체에 입사된 후, 산란체에서 수신기로 입사되는데 걸리는 시간을 추정하기가 시간 영역 음선 이론 기반의 잔향음^[6]에 비해 쉽지 않다는 단점이 있다. 이에 대하여 Ellis^[12]는 잔향음의 시간 종속성에 대해 모든 모드가 특정 지점에 도달하는 시간이 동일하다고 가정한 경우와 각 모드의 도달 시간이 각각의 군속도와 동일하다고 가정한 경우에 대해 제시하였다. 두 번째 가정이 첫 번째 가정보다 물리적으로 더 타당하지만, 단열성 모드법이나 연성 모드법과 같이 거리 종속 구간을 여러 개의 거리 독립구간으로 나누어 접근하는 방법에 이러한 방식을 적용할 때 계산량이 크게 증가한다. 그 이유는 특정 지점에서 발생한 잔향음 도달 시간의 가짓수가 거쳐 가는 구간들의 군속도 개수의 곱으로 표현되기 때문이다. 그러므로 고주파일 때와 같이 모드의 개수가 많을 때와 거리 종속을 표현하기 위한 거리 독립 구간의 개수가 많은 경우에는 계산량이 크게 증가하게 된다는 단점이 존재한다. 따라서 계산의 편의 상 본 연구에서는 이를 사용하지 않고, 모든 모드가 동일한 도달 시간을 갖는다는 가정을 이용하여 아래와 같이 계산을 수행하였다.

$$t = t_{sb} + t_{rb} = \frac{r_{sb}}{c_{sb}} + \frac{r_{rb}}{c_{rb}}. \quad (13)$$

이때 도달 시간은 다음 식과 같이 음원과 산란체 사이의 수평 방향 거리 r_{sb} , 수신기와 산란체 사이의 수평 방향 거리 r_{rb} 를 각각 음원/수신기-산란체 사이 공간의 평균 음속 $\overline{c_{sb}}, \overline{c_{rb}}$ 으로 나눈 시간으로 추정하였다. 이 가정은 기존 연구인 단열성 모드법을 이용한 거리 종속 환경에서의 잔향음 구현 방식에서도 동일하게 이용되었다.^[15]

음원 신호의 길이가 짧다는 가정 아래에서 위의 방법으로 각 모드에 의한 음압과 시간 종속성을 고려한 잔향음 식을 정리하면 다음과 같다.

$$RL(t) = E_0 \sum_m \sum_n |P_m^{inc(J)}(r_{sb}, z_b)|^2 \times |S_{m,n}| |P_n^{scatt(J)}(r_{rb}, z_b)|^2 \Delta A / \Delta t. \quad (14)$$

$E_0 = \int I_0(\tau) d\tau$ 는 음원 신호의 제공 값을 시간 적분한 값이며, ΔA 는 단위 산란체의 넓이이고, Δt 는 시간 간격을 나타낸다.

III. 예 제

III장에서는 본 논문에서 제시한 방법을 이용하여 거리 종속 환경에서 잔향음 계산을 수행하였다. 거리 독립 환경에서의 단상태와 양상태 잔향음을 계산하여 그 결과를 잔향음 모델링 워크숍 I의 결과와 비교하였을 때 잘 일치함을 확인하였으나, 그 결과는 거리 종속 환경이 아니기 때문에 논문에 따로 실지 않았다. 선택한 예제는 잔향음 모델링 워크숍 II^[19]의 거리종속 단상태 잔향음 환경과, 잔향음 모델링 워크숍 I^[19]의 거리종속 양상태 잔향음 환경인 문제 20번이다. 본 논문에서 제시한 연성모드법 기반 잔향음 모델과 비교한 대상은 Reference [6]에 사용된 음선 기반 비상관 잔향음을 개선한 모델로, 이전 버전과 같은 결과를 낸다는 것을 알리는 바이다.

3.1 잔향음 모델링 워크숍 II: 뉴저지 대륙붕 환경에서의 단상태 잔향음

이 장에서는 잔향음 모델링 워크숍 II에서 제시한 환경인 뉴저지 대륙붕에서 잔향음을 계산하고 논문

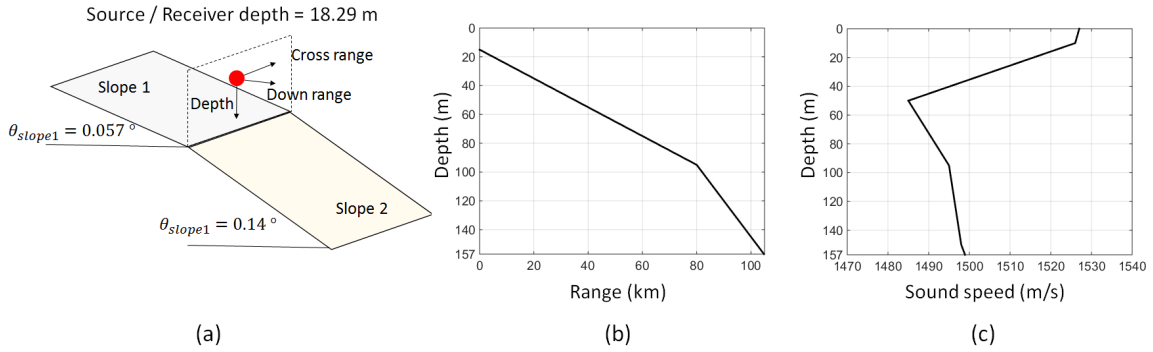


Fig. 2. Environment for the Reverberation modeling workshop(RMW) II. (a) monostatic reverberation geometry, (b) down range bottom geometry, and (c) sound speed profile.

에 실린 결과와 비교하였다. 기울기가 다른 두 경사면이 존재하는 환경에 대하여 연성모드법을 이용한 단상태 잔향음 계산을 수행한 뒤, 이를 음선 기반 잔향음 모델과 비교하였다. 이 때 산란함수는 위크숍 환경 정보와 같이 Von Karman 거칠기 스펙트럼을 적용한 소경사 근사법을 활용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{m,n,SSA} = \frac{1}{2\pi} |H(\mathbf{K}_{s,n}, \mathbf{K}_{i,m})|^2 \frac{h^2 K_L}{[(v_z h^2 K_L)^2 + v_i^2]^{3/2}} \quad (15)$$

여기서 $v = k_s - k_i$, $v_i = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ 이며, v_z 는 v 의 z방향 성분을 의미한다. h 는 해저면 거칠기 높이의 제곱 평균제곱근(rms)이며, K_L 은 상관계수 길이의 역수이다. $H(\mathbf{K}_{s,n}, \mathbf{K}_{i,m})$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(\mathbf{K}_s, \mathbf{K}_i) = \frac{[R_s(\mathbf{K}_{s,n}) + 1][R_i(\mathbf{K}_{i,m}) + 1]}{2i} \times \left\{ k_1^2 - \frac{\rho_1}{\rho_2} k_2^2 + \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) \times [\mathbf{K}_{s,n} \cdot \mathbf{K}_{i,m} - \frac{\rho_1}{\rho_2} k_{z,2}(\mathbf{K}_{s,n}) k_{z,2}(\mathbf{K}_{i,m})] \right\}, \quad (16)$$

이때 R_s 는 레일리(Rayleigh) 반사계수이며, $\mathbf{K}_{s,n}$ 는 산란 파수의 수평방향 성분 중, n번째 모드에 해당되는 접지 각에 관련된 성분이며, $\mathbf{K}_{i,m}$ 은 입사 파수의 평방향 성분 중, m번째 모드에 대한 접지 각에 관련된 성분이다. k_1, k_2, ρ_1, ρ_2 는 각 매질에서의 파수와 밀도이며 $k_{z,2}$ 는 바닥면에 수직인 파수 성분을 의미

Table 1. bottom property of the RMW II.

Density (kg/m ³)	Sound speed (m/s)	Attenuation (dB/m)	RMS height (m)	Correlation length (m)
1850	1650	0.0504 (200 Hz)	0.1414	10
		1.1707 (1600 Hz)		

한다. 이에 대한 자세한 정보는 Reference [6]을 참고 하길 바란다.

Fig. 2는 잔향음 모델링 위크숍 II의 단상태 잔향음 문제의 환경 정보이다. 해저 매질의 밀도, 음속, 감쇠 계수, 해저면 거칠기 정보는 Table 1에 기록하였다. 음원은 폭발물의 일종인 SUS(Sound Undersea Signals)를 이용하였는데, 200 Hz에서 E_0 는 224.4136 dB re 1 μ Pa, 1600 Hz에서 E_0 는 221.2345 dB re 1 μ Pa를 이용하였다.

Fig. 3은 연성모드법 기반의 잔향음과 음선 이론 기반의 잔향음을 비교한 결과로, Fig. 3(a)는 200 Hz, Fig. 3(b)는 1600 Hz이다. 두 모델을 비교하였을 때, 잔향음 변동 현상의 유무를 확인할 수 있다. 변동 현상의 경우, 음선 모델에서만 이러한 경향이 관측되는데, 200 Hz에서는 약 5 dB의 변동이 나타나고 1600 Hz에서는 약 13 dB의 변동이 나타난다. 이는 두 음파전달모델의 차이에서 기인한 것이다. 음선 기반 잔향음의 경우 해당 환경에서의 음속 구조로 인해 해저면의 계산 위치에 따라 음선들이 밀하거나 소한 구간들이 발생하여 시간에 따라 잔향음의 값이 변동하게 된다. 이러한 변동 현상이 규칙적으로 나타나다가 10 s를 지나면서 불규칙적인 경향으로 변화하게

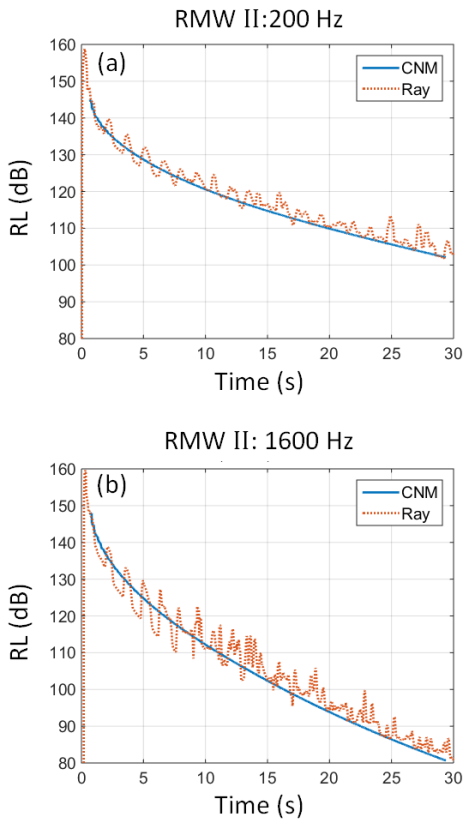


Fig. 3. Time vs. reverberation level plot of the RMW II environment. The result of coupled normal mode method(CNM) is compared to that of ray method with the frequency of (a) 200 Hz and (b) 1600 Hz.

되는데 이는 경사면으로 인하여 거리가 멀어지면서 음선의 밀한 구간과 소한 구간이 점차 흩어지기 때문이다.^[6] 반면 정상모드법 기반의 비상관 잔향음의 경우, 각 모드함수와 음원 계수에 절대값을 이용하여 위상 항이 없어지고 구간 내에서 거리에 따른 크기의 변화만이 고려되어 변동 패턴이 드러나지 않는다. 이러한 차이에도 불구하고 연성모드법 기반의 비상관 잔향음이 시간에 따른 감쇠 경향을 잘 모의하였기 때문에 거리 종속 환경에서의 연성모드법을 이용한 비상관 단상태 잔향음 모의 결과가 타당하다.

Fig. 4는 0~30s 구간에 해당되는 연성모드법 기반의 잔향음에 대해, 각 해저면의 기여도를 2차원 등고선으로 표현한 것이다. 이 때 각 위치에서의 값은 해당 면에서의 잔향음을 산란체의 면적으로 나눈 값이다. Fig. 4(a)는 200 Hz에서의 잔향음 결과이며 Fig. 4(b)는 1600 Hz에서의 결과이다. 음원과 수신기는 X

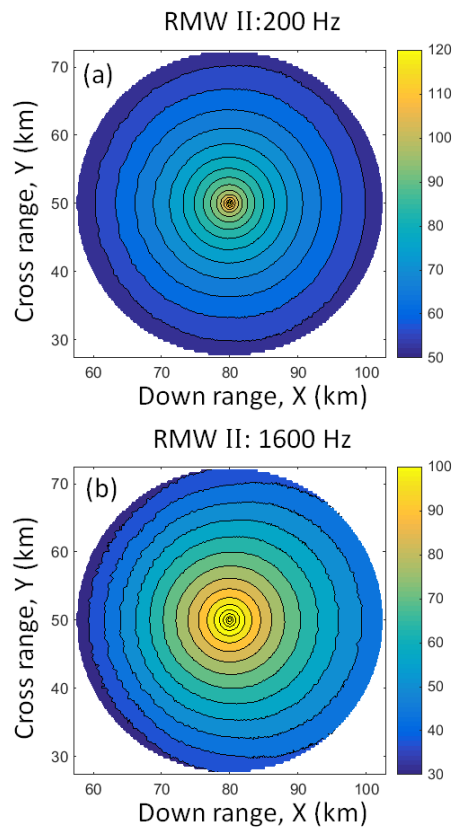


Fig. 4. Reverberation level per unit scatterer area of the RMW II environment with the frequency of (a) 200 Hz and (b) 1600 Hz.

= 80 km, Y = 50 km 지점에서 위치한다. 주파수에 따라 등고선의 경향이 다르다. 저주파는 X = 80 km 중심으로 등고선이 동심원을 이루는 반면, 고주파에서는 수심이 깊은 X > 80 km 쪽으로 등고선이 치우친 경향을 보인다. 이는 해저 매질의 감쇠 계수로 인한 반사 계수의 영향이다. 주어진 환경에서는 저주파에 비해 고주파에서 해저 매질의 감쇠 계수가 크고 임계각에서의 반사 손실이 크다. 그래서 수심이 얇아지는 X < 80 km 영역은 같은 거리를 전파할 때, 해저면에 부딪혀 반사되는 횟수가 수심이 깊은 X > 80 km 영역보다 많아 수심이 얇은 영역의 전달손실이 크게 나타난다. 그러므로 수심이 깊은 쪽의 잔향음의 기여가 크게 나타난다.

3.2 잔향음 모델링 워크숍 I: 문제 20, 양상태 잔향음

이 장에서는 잔향음 모델링 워크숍 I의 20번 문제

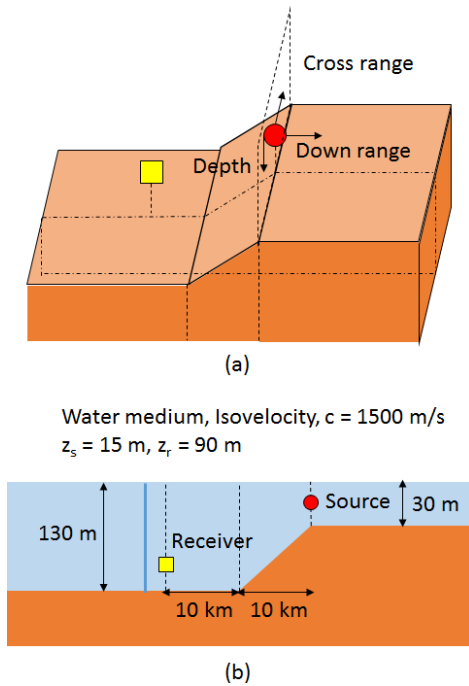


Fig. 5. Environment of the problem XX in the RMW I. (a) bistatic reverberation geometry, and (b) down range direction geometry.

Table 2. Bottom property of the problem XX in the RMW I.

Density (kg/m ³)	Sound speed (m/s)	Attenuation (dB/λ)	Lambert coefficient (dB)
2000	1700	0.5	-27

에 대해 연성모드법을 이용하여 계산하여 음선모델 기반 양상태 잔향음 모델과 비교하였다. 산란함수는 문제에 주어진 대로 일반 Lambert 법칙을 이용하였다. Lambert 법칙은 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{m,n,LL} = \mu \sin\theta_m \sin\theta_n, \tag{17}$$

이때 μ 는 산란함수의 크기를 나타내는 Lambert 계수이며, θ_m 과 θ_n 은 각각 m 번째 입사 모드와 n 번째 산란 모드에 해당되는 접지 각들이다. 주어진 문제 상황에서는 일반적인 Lambert 법칙을 제시하였기 때문에 양상태 보정 항은 고려하지 않았다.

Fig. 5(a), (b)를 통해 문제 20의 양상태 잔향음 환경 정보를 확인할 수 있으며, 해저 매질의 정보와 산란 함수 세기는 Table 2에서 확인할 수 있다. 음원은 위

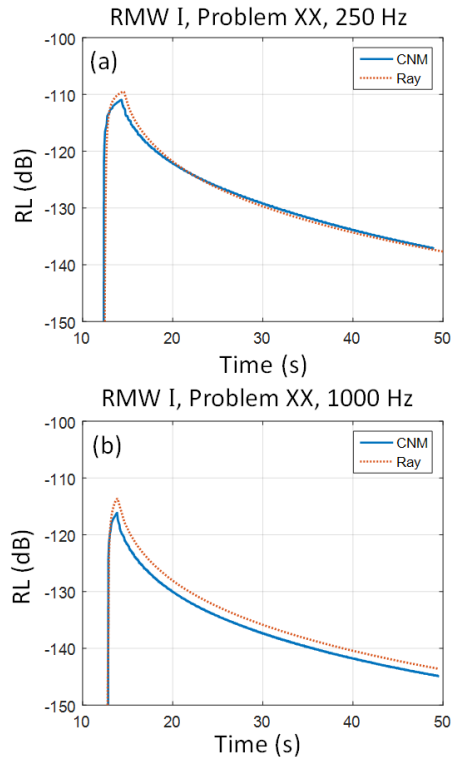


Fig. 6. Time vs. reverberation level plot of the problem XX in the RMW I environment. The result of CNM is compared to that of ray method with the frequency of (a) 250 Hz and (b) 1000 Hz.

크숍에서 제시한 가우시안 형태를 사용하였는데 250 Hz에서 E_0 는 -17.2610 dB re 1 μ Pa를 이용하고, 1000 Hz에서 E_0 는 -23.2816 dB re 1 μ Pa를 이용하였다.

계산 결과 및 음선 이론 기반의 잔향음과의 비교는 Fig. 6에서 확인할 수 있다. Fig. 6(a)는 250 Hz에서의 잔향음 결과이며, Fig. 6(b)는 1000 Hz에서의 결과이다. 두 모델 결과 모두 13.6 s 근방에서부터 잔향음 신호가 계측되기 시작되는데, 이는 음원과 수신기 사이의 거리가 20 km 떨어져 있기 때문이다. 40 s에서 두 모델 간의 잔향음 값의 차이는 250 Hz의 경우 -0.4 dB, 1000 Hz의 경우에 +1.4 dB이다. 두 모델의 차이는 잔향음 모델의 음파전달모델의 차이와 시간 종속성 구현 방법의 차이에서 기인한 것으로 추정된다. 본 논문이 제시한 연성모드법 기반의 잔향음은 도달 시간을 계산 시, 모든 모드가 동일한 시간에 도달한다고 가정하고 수평거리를 평균음속으로 나눈 값을 이용하기 때문에 각 고유 음선의 경로와 음속 구조를 반영하여 구한 도달시간보다 더 정확하지 않다. 이

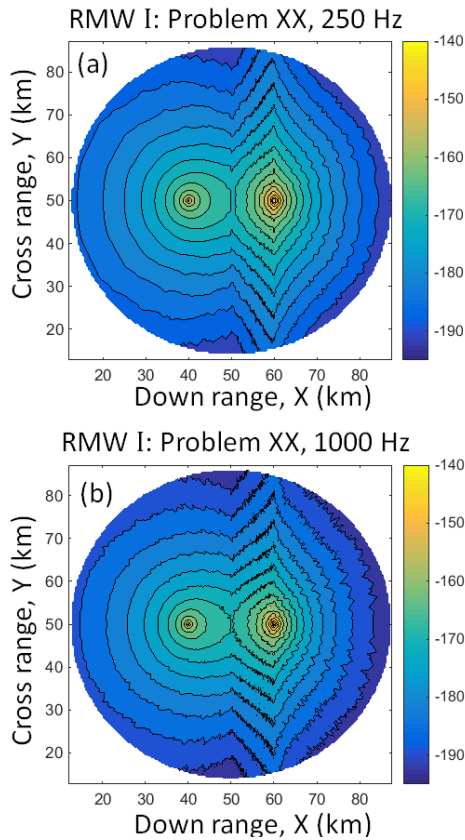


Fig. 7. Reverberation level per unit scatterer area of the problem XX in the RMW I environment with the frequency of (a) 250 Hz and (b) 1000 Hz.

러한 차이가 있음에도 시간에 따른 감쇠 정도의 경향성이 검증된 모델과의 결과와 유사하기 때문에, 본 논문에서 제시한 연성모드법 기반의 양상태 잔향음 모델의 결과가 타당하다.

Fig. 7은 0 ~ 50 s 구간에 해당되는 연성모드법 기반의 잔향음에 대해, 각 해저면의 기여도를 2차원 등고선으로 표현한 것이다. Fig. 7(a)는 250 Hz에서의 잔향음 결과이며 Fig. 7(b)는 1000 Hz에서의 결과이다. 이때 각 위치에서의 값은 앞의 예제와 같은 방법으로 구하였다. 음원은 X = 60 km, Y = 50 km 지점에서 위치하며, 수신기는 X = 40 km, Y = 50 km 지점에 위치한다. 음원이 위치한 X = 60 km 지점에서 Y축 방향으로 분포하는 해저면의 기여도가 크다는 것을 확인할 수 있으며, 수심이 낮은 X > 60 km 지점에서 전달 손실이 크기 때문에 수심이 깊은 X < 40 km 지점에 비하여 잔향음의 기여도가 작다는 것을 확인할 수 있다. 3.1의 예제와 다르게 주파수에 따라 등고선의 경

향이 비슷하게 나타나는 이유는 감쇠 계수가 dB/λ로 주어져 주파수에 대한 반사 계수의 값이 동일하기 때문이다.

IV. 결 론

정상모드법은 높은 정확도로 음압을 구할 수 있어 정상모드법 기반의 잔향음의 신뢰도가 높다. 이를 확장하여 음속과 해저 지형이 변하는 거리 종속 환경에서의 시간에 대한 잔향음의 감쇠 경향을 계산하기 위해 단방향 연성모드법을 이용하여 음압을 구하고, 기존의 정상모드법에서 사용하는 시간 종속성에 대한 가정을 적용하여 비상관 잔향음을 계산하였다. 검증을 위해 잔향음 모델링 워크숍에서 제시한 거리 종속 환경에 대하여 계산을 수행하고, 기존에 존재하는 음선 이론 기반의 비상관 잔향음과 비교해 보았을 때 유사한 경향이 나타남을 확인할 수 있다. 또한 2차원 등고선을 통해 거리 종속 환경에서 각 해저면의 위치에 따른 잔향음의 기여도를 확인하였는데, 주파수에 대한 해저 매질의 특성과 거리 종속 지형의 특성에 따라서 등고선의 형상이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 향후 본 논문이 제시한 방법을 이용해 거리 종속 해양 환경에서 비상관 잔향음을 효과적으로 추정할 수 있을 것이라 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었다(계약번호: UD130016DD).

References

1. D. D. Ellis and J. R. Preston, "An initial model-data comparison of reverberation and clutter from a near-shore site in the Gulf of Mexico," in Proc. Mtgs. Acoust. **19**, 070007-1-9 (2013).
2. F. S. Henyey and D. Tang, "Reverberation clutter induced by nonlinear internal waves in shallow water," J. Acoust. Soc. Am. **134**, EL289-EL293 (2013).
3. C. H. Harrison, "Closed-form expressions for ocean reverberation and signal excess with mode stripping and Lambert's law," J. Acoust. Soc. Am. **114**, 2744-2756 (2003).
4. C. H. Harrison, "Closed form bistatic reverberation and target

- echoes with variable bathymetry and sound speed," IEEE J. Oceanic Eng. **30**, 660-675 (2005).
5. R. E. Keenan, "An introduction to GRAB eigenrays and CASS reverberation and signal excess." in OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. 1065-1070, (2000).
 6. Y. M. Choo, W. J. Seong and W. Y. Hong, "Modeling and Analysis of Monostatic Seafloor Reverberation from Bottom Consisting of Two Slopes," J. Computational Acoust. **22**, 1450005-1~15 (2014).
 7. K. H. Lee, Y. M. Chu and W. J. Seong, "Geometrical ray-bundle reverberation modeling," J. Computational Acoust. **21**, 1350011-1~17 (2013).
 8. J. F. Lingeitch and K. D. LePage, "Parabolic equation simulations of reverberation statistics from non-Gaussian-distributed bottom roughness," IEEE J. Oceanic Eng. **35**, 199-208 (2010).
 9. M. J. Isakson, B. Goldsberry, and N.P. Chotiros, "A three-dimensional, longitudinally-invariant finite element model for acoustic propagation in shallow water waveguides," J. Acoust. Soc. Am. **136**, EL206-EL211 (2014).
 10. H. P. Bucker and H. E. Morris, "Normal-Mode Reverberation in Channels or Ducts," J. Acoust. Soc. Am. **44**, 827-828 (1968).
 11. R. Zhang and G. Jin, "Normal-mode theory of average reverberation intensity in shallow water," J. Sound Vib. **119**, 215-223 (1987).
 12. D. D. Ellis, "A Shallow-Water Normal-Mode Reverberation Model," J. Acoust. Soc. Am. **97**, 2804-2814 (1995).
 13. J. R. Preston and D. D. Ellis, "Report on a normal mode and Matlab based reverberation model," DRDC Atlantic TM 2006-290, 2008.
 14. S. T. Oh, S. H. Cho, D. H. Kang and K. J. Park, "Low-frequency normal mode reverberation model" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **34**, 184-191 (2015).
 15. J. R. Preston and D. D. Ellis, "A Matlab and normal mode based adiabatic range-dependent reverberation model," in 4th International Conference and Exhibition on UAM: Technologies & Results, 667-674 (2011).
 16. K. D. LePage, "Bistatic reverberation modeling for range-dependent waveguides," J. Acoust. Soc. Am. **112**, 2253-2254 (2002).
 17. R. B. Evans, "A coupled mode solution for acoustic propagation in a waveguide with stepwise depth variations of a penetrable bottom," J. Acoust. Soc. Am. **74**, 188-195 (1983).
 18. M. B. Porter, F. B. Jensen and C. M. Ferla, "The problem of energy conservation in one-way models," J. Acoust. Soc. Am. **89**, 1058-1067 (1991).
 19. J. S. Perkins and E. I. Thorsos, "Overview of the reverberation modeling workshops," J. Acoust. Soc. Am. **122**, 3074-3074 (2007).

저자 약력

▶ 박 중 용 (Jungyong Park)



2012년 2월: 서울대학교 조선해양공학과
학사
2012년 2월 ~ 현재: 서울대학교 조선해양
공학과 박사과정

▶ 추 영 민 (Youngmin Choo)



2005년 8월: 서울대학교 조선해양공학과
학사
2012년 8월: 서울대학교 조선해양공학과
박사
2015년 ~ 2016년: Post doctor, Marine Physical
Laboratory, SIO, UCSD.
2012년 ~ 현재: 서울대학교 해양시스템공학
연구소 연구교수

▶ 이 근 화 (Keunhwa Lee)



2000년 2월: 서울대학교 조선해양공학과
학사
2006년 2월: 서울대학교 조선해양공학과
박사
2006년 ~ 2014년: 서울대학교 해양시스템
공학연구소 연구교수
2014년 ~ 현재: 세종대학교 국방시스템
공학과 조교수

▶ 성 우 제 (Woojae Seong)



1982년 2월: 서울대학교 조선공학과 학사
1984년 2월: 서울대학교 해양공학 석사
1990년 2년: M.I.T 해양공학과 박사
1991년: M.I.T Post-doctoral Associate
1992년 ~ 1996년: 인하대학교 선박해양
공학과 조교수
1996년 ~ 현재: 서울대학교 조선해양공학과
교수