

음선 모델에 적용된 이층 해저 바닥 모델의 유효성

Validity of Two-layered Ocean Bottom Model for Ray Model

이근화, 성우제*†

(Keunhwa Lee and Woojae Seong*†)

세종대학교 국방시스템공학과, *서울대학교 조선해양공학과

(Received October 2, 2015; revised November 9, 2015; accepted November 12, 2015)

초 록: 음선 모델링에서 다층 해저 바닥을 고려하는 경험적 방법 중 하나는 단일층 가정으로써, 다층 구조에 대한 평면파 반사계수를 사용하는 것이다. 본 연구자는 이층 해저 바닥에 대해 단일 층 가정의 유효성을 조사하고, 음속비, 송수신 거리 당 층 두께, 1차 반사파의 스킴각의 함수로 표현되는 간단한 부등식 조건을 얻었다. 부등식 조건으로부터, 단일 층 가정이 실제 해양 환경의 중주파수 음선 모델링에 적용될 수 있음을 보였다. 마지막으로 한국 동해와 유사한 해양환경에 대해 수치실험을 수행하였다. 다층 해저 바닥에 대한 평면파 반사계수를 적용한 기하학적 빔 모델을 이용하여 비상관 전달손실을 계산하고, 서울대학교에서 개발한 포물선 방정식 패키지인 SNUPE 2.0의 결과와 비교하였다. **핵심용어:** 기하학적 빔, 음선 모델, 평면파 반사계수, 이층 해저 바닥, 단일 층 가정

ABSTRACT: A heuristic method treating a layered ocean bottom in a ray modeling is to use the plane wave reflection coefficient for multiple-layered structure, named an one-layer assumption in this paper. We examine the validity of one-layer assumption in the case of two-layered ocean bottom, and obtain a simple inequality condition depending on the sound speed ratio, the ratio of layer thickness to source-receiver range, and the grazing angle of first reflected ray. From this inequality condition, it is shown that an one-layer assumption can be applicable to ray propagation problems at mid frequencies. Finally, numerical experiments are performed in the ocean environment similar to the East Sea in Korea. Incoherent transmission loss is calculated by the geometrical beam model with the plane wave reflection coefficient for multiple-layered ocean bottom and compared with the result of SNUPE 2.0, which is a parabolic equation package developed in Seoul National University.

Keywords: Geometrical beam, Ray model, Plane wave reflection coefficient, Two-layered ocean bottom, One-layer assumption

PACS numbers: 43.30.Cq, 43.30.Ma

1. 서 론

수중음향분야에서 활용되는 음선 알고리즘은 일반적으로 단층의 해저바닥을 가정한다.^[1] 비록 국내 외에서 다층 구조의 해저바닥을 고려하는 음선 알고리즘^[2-3]이 발표된 적은 있으나 연구용을 제외하고는 실제 해양환경의 시뮬레이션에 적용된 경우는 거의 없다. 그 이유는 다음과 같다. 우선 음선 모델은 기본적으로 고주파수에서 유도되는 모델이라는 점이다.

고주파수 영역에서는 해저 바닥에서 음파의 감쇠가 커지기 때문에 해저 바닥의 다층구조보다는 해저면에서 수 미터에서 수십 미터 이내의 해저퇴적물 층의 물성이 중요해진다. 특히 주파수가 높을수록 음파가 유효한 해저퇴적층의 깊이는 상대적으로 작아지고, 심지어 종종 해저퇴적물 시료의 측정 오차보다도 작기 때문에, 단층의 해저바닥으로 가정하는 것이 합리적이다. 중주파수영역이나 근거리 음전달의 경우에는 해저 바닥의 다층구조의 영향이 나타날 수 있다. 실제로 중주파수 근거리 지음향 역산에서는 종종 다층구조를 고려하여 시뮬레이션을 수행한다.^[4-5] 하지만 소나 성능 분석을 목적으로 하는 음선

†Corresponding author: Woojae Seong (wseong@snu.ac.kr)
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Building 34, Room 306, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Republic of Korea
(Tel: 82-2-880-8359, Fax: 82-2-888-9298)

“이 논문은 2015년 한국음향학회 수중음향학 학술발표회에서 발표하였던 논문임.”

시뮬레이션에서는 다층 구조를 고려하는 경우는 없다. 왜냐하면 다층구조/면 거리 음전달에서는 투과 음선에 의한 복반사와 투과파가 순차적으로 발생하여 음선 추적의 양이 기하급수적으로 늘어나는데 이를 수치적으로 구현하는 것은 매우 비효율적이기 때문이다. 게다가 일일이 음선 추적을 하였다 하더라도 각 음선의 크기와 위상을 구하는 일이 매우 어렵다. 해저 바닥의 다층 구조에서는 해수 층과는 달리, 복반사파의 빔 변위,^[1] 감쇠투과음장에 의한 복소 음선,^[3] 구면파 반사,^[2,6] 선두 파^[7] 등의 고려해야 될 추가적인 물리현상이 많기 때문이다. 이론적으로는 여러 물리현상에 의한 위상변화와 크기변화를 모두 추적하여 알고리즘을 구성하는 것이 가능하나 효율적으로 구현하는 것은 매우 어렵다. 또한 음선 법 자체가 해양환경에 대해서도 여러 제한조건이 들어가는 근사해라는 것을 감안하면, 해저 바닥에 대한 알고리즘의 정확도를 향상시키는 것은 상대적으로 부차적인 일일 수밖에 없다.

최근 Hovem^[8]은 거리중속 환경에 대한 음선 모델을 발표했다. 그의 연구 중 재미있는 부분은 수중 도파관의 이층 해저 바닥을 단층 구조로 가정하고, 대신에 이층 구조에서 유도되는 평면파 반사계수를 이용하여 해저면 반사를 모의했다는 점이다. Hovem은 개발한 음선 모델의 유효성을 설명하기 위해 Brekhovskikh의 구면파의 평면파 근사 조건만을 언급하였을 뿐, 음선 모델에 적용된 다층 구조의 평면파 반사계수의 유효성에 대해서는 언급하지 않았다.

본 연구에서는 이층 해저 바닥에 의해 생성되는 복반사파를 해저면에서의 1차 반사파만으로 취급할 수 있는 해석 조건을 이론적으로 유도하였다. 또한 기존에 본 저자들에 의해 개발된 기하학적 빔 모델에 이층 해저 바닥에 대한 평면파 반사계수를 적용하여 그 유효성을 검증하였다. II장에서는 해석 조건의 이론적 유도를 다루었으며, III장에서는 단일 층 가정을 이용한 음선 알고리즘을 서술하고, IV장에서는 수치 실험결과를 기술하였다. V장은 결론 및 토론이다.

II. 단일 층 가정의 유효성

Fig. 1의 (a)와 (b)는 각각 기하학적 음선과 평면파

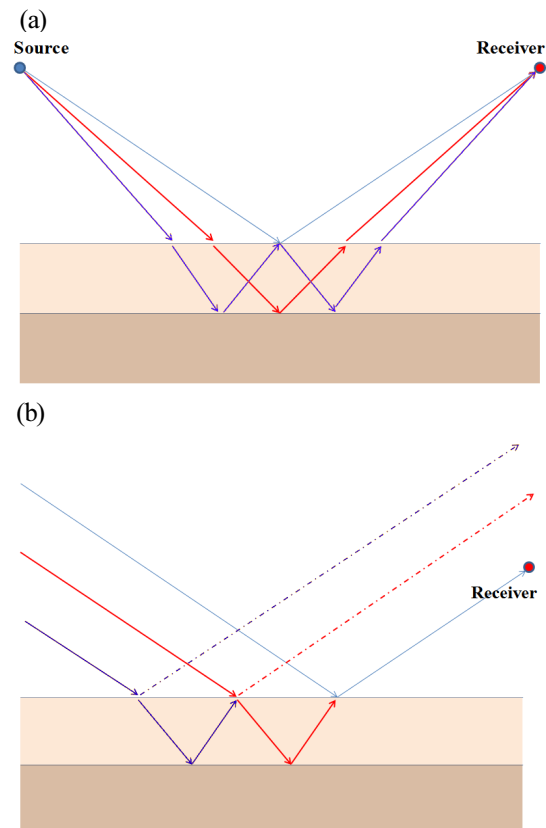


Fig. 1. Concept of (a) geometrical rays and (b) plane waves in the upper half-space with two-layered ocean bottom.

의 개념을 보여준다. 기하학적 음선은 음원으로부터 실수의 입사각을 갖고 마치 선처럼 전파하는 음장을 말한다. 기하학적 음선이 해저면을 만나면 경계조건에 의해 1차 반사파와 투과파가 생성되고, 투과파는 해저 바닥의 다층구조에 따라 복반사파와 재투과파를 연속적으로 만든다. 이러한 무수한 음선 중에 음원과 수신원 사이의 최소경로에 해당하는 음선이 고유음선이 되는 것이다. 무한영역의 수층에서 발생하는 고유음선은 최대 2개 이하지만, 해저면이 존재하는 경우에는 해저 바닥의 다층 구조에 따라 여러 개의 고유음선이 존재할 수 있다.

평면파는 기하학적 음선과 달리 장의 개념으로 설명할 수 있다. 하나의 파수를 갖는 음장이 해저면으로 입사한다고 할 때, Fig. 1 (b)처럼 해저 바닥의 다층 구조에 의해 복반사 평면파와 재투과 평면파가 형성된다. 이때 수층으로 되돌아오는 반사파는 모든 복반사 평면파의 합으로 구할 수 있다.

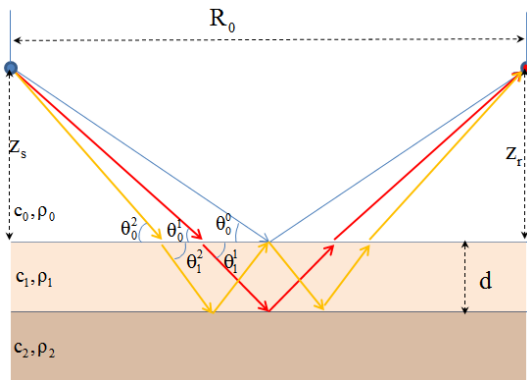


Fig. 2. Environmental parameters and geometry used for theoretical analysis.

평면파는 구면파 음원의 먼 거리 근사로 볼 수 있기 때문에, 음원과 수신원 사이의 거리가 멀 때에는 평면파를 기하학적 음선 개념으로 취급할 수 있을 것이다. 주의할 점은 먼 거리라 하더라도 위의 두 가지 물리량이 항상 서로 동일한 것은 아니라는 것이다. 기하학적 음선은 실수의 입사각에서 정의되는 물리량이기 때문에, 평면파에서 설명 가능한 감쇠효과는 설명할 수 없다.

위에서 기술했듯이 평면파와 기하학적 음선은 평면파 가정을 통해서 연결고리를 가진다. 그러므로 기존의 무한 영역에서의 평면파 가정을 이층 해저 바닥의 해저면 반사에 대해 확장하는 것을 통해, 단일 층 가정의 유효성을 평가할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 두 가지의 접근법으로 단일 층 가정의 유효성을 평가했다. 우선 Fig. 2에서처럼 이층의 해저 바닥위에 상부의 반 무한영역이 존재한다고 가정한다. 음원과 수신원이 상부의 반 무한영역에 존재한다고 할 때, 음원과 수신원 사이에는 이층 해저 바닥 때문에 수많은 고유음선이 존재한다. Fig. 2에서 보듯이 이 고유 음선들이 해저면과 부딪힐 때 음선의 입사각은 모두 다르다. 만약 각각의 고유음선의 입사각이 서로 비슷하다면 다층 구조에 대한 평면파 반사계수를 사용할 수 있는 필요조건이 성립될 것이다.

Fig. 2에서 음선이 두 번째 해저면과 부딪히는 횟수에 따라서 n 번째 음선이라고 정의한다. 예를 들어, 0번째 음선은 두 번째 해저면과 0번 부딪히는 음선으로 첫 번째 해저면에서만 반사되는 음선을 의미한

다. 이때, n 번째 음선의 첫 번째 해저면에서의 스킴각을 θ_0^n 이라고 하고, 첫 번째 해저 층에서 투과각을 θ_1^n , 첫 번째 해저 층의 두께를 d , 음원의 수심을 z_s , 수신원의 수심을 z_r 이라고 하고, 음원과 수신원 거리가 R_0 만큼 떨어져 있다고 한다. 수층의 음속과 밀도는 c_0 와 ρ_0 , 첫 번째 해저 층의 음속과 밀도는 c_1 와 ρ_1 , 두 번째 해저 층의 음속과 밀도는 c_2 와 ρ_2 로 표기한다.

이때, 각 경계면에서 스넬의 법칙과 기하학적 조건에 의해 아래와 같은 등식이 성립한다.

$$\frac{\cos\theta_0^n}{c_0} = \frac{\cos\theta_1^n}{c_1} = \frac{\cos\theta_2^n}{c_2}, \quad (1)$$

$$\frac{(z_s + z_r)}{\tan\theta_0^n} + \frac{2nd}{\tan\theta_1^n} = R_0. \quad (2)$$

Eqs.(1)과(2)가 성립하기 위한 전제 조건은 음선이 해저면의 첫 번째 층에서 전반사를 하지 않는다는 것이다. 첫 번째 해저면에서 전반사를 하는 경우에는 음선추적에서 하부의 해저바닥을 고려할 필요가 없다.

$x = \tan\theta_0^n$ 라 치환하고, Eqs.(1)과(2)를 이용하여 x 에 대한 방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$x^4 - 2\alpha x^3 + [(1 - \beta^2) + \alpha^2 - 4\gamma^2\beta^2]x^2 - 2\alpha(1 - \beta^2)x + (1 - \beta^2)\alpha^2 = 0, \quad (3)$$

여기서 $\alpha = \frac{z_s + z_r}{R_0} = \tan\theta_0^n$, $\beta = \frac{c_1}{c_0}$, $\gamma = \frac{nd}{R_0}$ 이다.

본 연구에서 다루는 문제는 결국 Eq.(3)에서 x 의 값이 α 와 유사해지는 조건을 찾는 것으로 귀결된다. Eq.(3)을 구성하는 3개의 무차원수 중에 기하학적 특성을 나타내는 해양환경 변수는 γ 이다. 이와 같은 문제의 특성을 이용하여, Eq.(3)을 문제에 적합한 식으로 정리하면 아래와 같이 된다.

$$(x - \alpha)^2 = \frac{4\gamma^2\beta^2x^2}{x^2 + 1 - \beta^2}. \quad (4)$$

Eq.(4)의 근사해는 식의 형태상 $x_0 = \alpha$ 라 놓고, 연속

적인 수열을 이용해 간단히 얻을 수 있다. 그 결과는 아래와 같다.

$$x = \alpha \left(1 + \frac{2\gamma\beta}{\sqrt{\alpha^2 + 1 - \beta^2}} \right) + O(\gamma^2). \quad (5)$$

Eq.(5)로부터 결국 아래와 같은 조건이 성립할 때 단일 층 가정은 유의미한 것을 알 수 있다.

$$\frac{2\gamma\beta}{\sqrt{\alpha^2 + 1 - \beta^2}} \ll 1. \quad (6)$$

두 번째는 평면과 가정의 확장을 통해 단일 층 가정의 유효성을 평가했다. Fig. 3은 해저면에서 첫 번째 반사파와 첫 번째 지층과 두 번째 지층사이의 경계면에서의 두 번째 반사파의 전달 경로를 도시한 것이다. 계산 편의상 음원과 수신원의 위치는 동일하다고 가정한다.

Fig. 3에서 Fraunhofer 가정^[9]을 이용하여 경로 $\overline{SO'}$ 를 경로 \overline{SO} 와 경로 $\overline{OO'}$ 의 합수로 근사를 하면, $\overline{SO'} \approx \overline{SO} \left[1 - \left(\frac{z}{y} \right) \cos\theta_0^0 + \left(\frac{z}{y} \right)^2 \frac{\sin^2\theta_0^0}{2} + \dots \right]$ 이 된다. 여기서 $y = R / (2\cos\theta_0^0)$ 이고, $z = d / \tan\theta_1^1$ 이다. 위의 대괄호에서 두 번째 항까지 고려할 때, 세 번째 항이 두 번째 항보다 매우 작은 경우에는 근사식의 정확도가 높아질 것이다. 이 조건을 n번째 음선에 대해 일반화하여 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\frac{\gamma\beta \sin^2\theta_0^0}{\sqrt{\alpha^2 + 1 - \beta^2}} \ll 1. \quad (7)$$

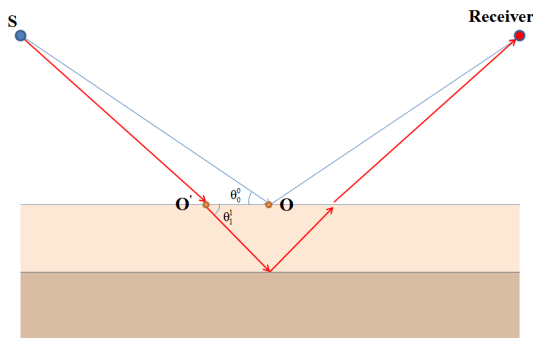


Fig. 3. Ray trajectory and notation for fraunhofer approximation.

평면과 가정을 통한 접근 방법과 각도 근사를 통한 접근 방법은 서로 근사하는 물리량이 다르지만, 얻어지는 결과인 Eqs.(7)과 (6)의 형태는 근사적으로 매우 유사한 것을 알 수 있다.

위 식에서 β 는 해양환경에 의해 주어지는 음속비이므로 크게 변하지 않는다고 볼 수 있다. Eq.(7)은 음선이 수직에 가깝게 입사하는 경우처럼 α 가 작은 경우, 음선이 수평에 가깝게 입사하는 경우처럼 α 가 큰 경우, 해저층의 두께가 음원과 수신기 사이의 거리에 비해 작은 경우처럼 γ 가 작은 경우에 잘 만족하는 것을 알 수 있다. 여기서 음원과 수신원 사이의 거리는 일반적인 해양환경에서는 음선순환거리(ray cycle distance)로 치환할 수 있을 것이다. 음선순환거리는 해양에서 수평에 가깝게 전파하는 음선일수록 길다. 그렇기 때문에 Eq.(7)은 먼 거리 음전달에 더 잘 만족된다는 것을 유추할 수 있다.

Eq.(7)이 성립한다고 하고 0번째 음선의 전달 경로를 s_w 라고 하면, n번째 음선의 전달 경로는 아래와 같이 표현된다.

$$s_t^n = s_w^n + s_s^n \approx \left(s_w - \frac{2nd}{\tan\theta_1^1} \cos\theta_0^0 \right) + \frac{2nd}{\sin\theta_1^1}, \quad (8)$$

여기서 s_w^n 는 n 번째 음선의 수중에서의 전달경로를 의미하며, s_s^n 는 n번째 음선의 해저층에서의 전달경로를 의미한다. Eq.(8)의 마지막 줄에 소괄호로 묶인 부분이 수중에서의 전달경로이고 나머지 항이 해저층에서의 전달 경로이다.

한편, Figs. 2와 3과 같은 환경에서 수신원에 들어오는 전체 음장은 고유음선의 합으로 아래와 같이 주어진다.

$$p_r = R_{01} \frac{e^{jk_0 s_w^0}}{S_w^0} + \sum_{n=1}^{\infty} T_{01} T_{10} R_{12} (R_{10} R_{12})^{n-1} \frac{e^{j[k_0 s_w^n + k_1 s_s^n]}}{S_t^n}, \quad (9)$$

여기서 R_{ij} 와 T_{ij} 는 각각 i번째 지층과 j번째 지층사이의 반사계수와 투과계수를 나타낸다. 0번째 지층은 수층을 의미한다.

최종적으로 Eq.(9)에 Eq.(8)을 대입하여 정리하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$p_r = \frac{R_{01} + R_{12} e^{j2k_1 d \sin \theta_1}}{1 + R_{01} R_{12} e^{j2k_1 d \sin \theta_1}} \frac{e^{jk_0 s_w^0}}{s_w^0} = R_T \frac{e^{jk_0 s_w^0}}{s_w^0}, \quad (10)$$

Eq.(10)의 첫 번째 줄에 우측의 첫 번째 나타나는 분수 항은 이중 해저 바닥 모델에 대한 평면파 반사계수(R_T)가 된다. 결국 Eq.(7) 또는 Eq.(6)이 성립하는 경우에는 단일 층 가정이 유효함을 알 수 있다.

Fig. 4는 위에서 유도한 부등식 조건의 유효성을 보여준다. Fig. 4의 결과를 얻기 위해 Fig. 3과 같은 이중바닥을 가진 반무한 해양환경을 가정하고 해석을 수행했다. 음원과 수신기는 해저면으로부터 100 m의 위치에 놓았으며, 첫 번째 해저지층은 음속 1447.5 m/s, 밀도 1.331 g/cm³, 감쇠계수 0.02 dB/λ의 매질이고, 두 번째 지층은 음속 1590 m/s, 밀도 1.9 g/cm³, 감쇠계수 0.2 dB/λ의 매질이라 가정한다. 주파수는 1 kHz를 사용했다. Fig. 4(a)는 Eq.(9)의 p_{r,s_w^0} 의 절대값을 수심(γ 에 대응)과 스침각(α 에 대응)의 함수로 dB레벨로 그린 것이고, Fig. 4(b)는 Eq.(10)의 p_{r,s_w^0} 의 절대값을 그린 것이다. Fig. 4(b)의 경우에 p_{r,s_w^0} 의 절대값은 R_T 의 절대값이 된다. Fig. 4(c)는 위의 두 식의 차이의 절대값을 선형눈금으로 나타낸 것이다. Fig. 4(c)를 보면 Eq.(9)는 음선이 수평 및 수직에 가까운 스침각 영역에서 전파하는 경우 및 해저층의 두께가 작은 경우에 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞부분에서 기술한 부등식의 유효조건과 일치한다.

III. 단일 층 가정을 이용한 음선 알고리즘

단일 층 가정을 적용하여 해양 환경에서 음파 전달을 모의하는 것은 매우 쉽다. 음선 추적은 기존처럼 해수면과 해저면으로 둘러싸인 수중도파관내에서 수행한다. 차이점은 음선이 바닥을 맞고 반사될 때마다, Eq.(10)과 같이 이중 구조의 해저바닥에 대한 반사계수를 이용하여 음파에너지의 손실을 고려해준다는 점이다.

본 연구에서는 저자들이 개발한 수중도파관에서의 기하학적 빔 모델에 다층 구조에 대한 해저바닥

모델을 결합시켰다. 다층구조에 대한 해저바닥 모델은 Reference [10]의 연구결과를 이용했다.^[10] 이 해저

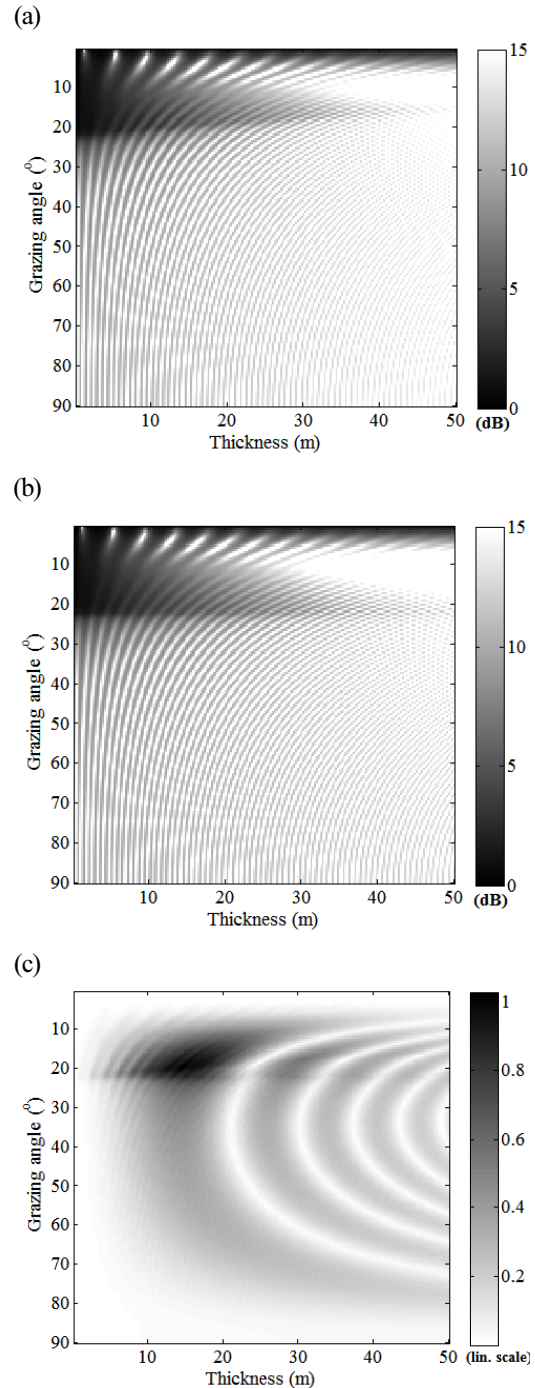


Fig. 4. Reflection loss as a function of grazing angle and thickness calculated from (a) p_{r,s_w^0} of Eq.(9) and (b) p_{r,s_w^0} of Eq.(10), and (c) the absolute value of their differences in linear scale as functions of grazing angle and thickness.

바다모델은 일반적인 다층구조에 대한 반사계수 모델로서, 다층구조를 구성하는 각각의 지층은 Biot의 다공성 매질, 탄성매질, 유체매질 중에서 임의로 선택할 수 있다.

IV. 수치 예제

단일 층 가정의 유효성을 수치적으로 검증하기 위해 동해의 여름해양환경에 대한 수치실험을 수행했다. Fig. 5는 수치해석에 사용한 해양환경을 보여준다. 음속은 전형적인 동해의 여름음속이며, 음원은 해수면을 기준으로 9m의 수심에 위치해 있다. 이 경우에 음파에너지는 음속 때문에 하향굴절을 하며 약 9~12°에 해당하는 입사각을 가진 음선만 먼 거리까지 전파를 하게 된다. 해저 지층은 이층 해저 바닥으로 가정했다. 첫 번째 지층은 점토에 해당하는 느린 바닥으로 두께는 40 m이고, 두 번째 바닥은 모래에 해당하는 빠른 바닥이다.

Fig. 6은 1490 Hz와 3000 Hz에서 평면파 반사계수를 계산한 결과를 보여준다. 비교를 위해 $R_{01}, R_{02}, d=0$ 일 때의 이층 구조 반사계수를 함께 도시하였다. Fig. 6을 보면 전반적으로 이층 구조 반사계수는 R_{01} 과 비슷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것의 주원인은 해당 주파수 대역이 지층의 두께에 비해 고주파수이기 때문이다. 그 결과 첫 번째 지층에서 투과된 음파 대부분이 감쇠를 하게 되어 두 번째 지

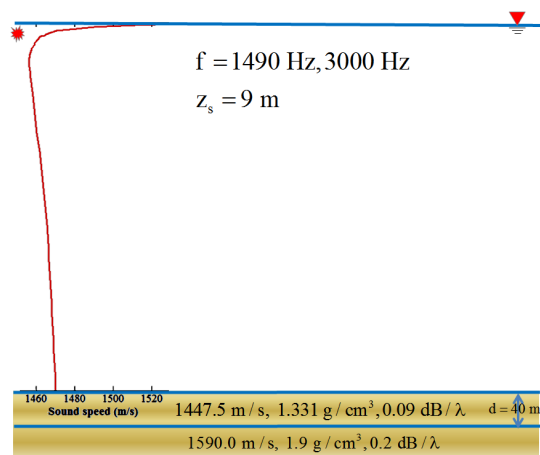


Fig. 5. Illustration of ocean environment used for numerical analysis.

층의 영향이 나타나지 않는다. 이것은 Fig. 6(a)의 이층 구조 반사계수보다 Fig. 6(b)의 반사계수가 훨씬 더 R_{01} 과 비슷한 이유이기도 하다. 또한, 낮은 스침각 영역에서는 감쇠가 발생하는 첫 번째 지층에서의 전달거리가 상대적으로 길기 때문에, 두 번째 지층의 영향이 더 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 높은 스침각 영역에서는 상대적으로 작은 감쇠로 인해서 첫 번째 해저면에서의 반사파와 두 번째 해저면에서의 복반사파와의 간섭에 의해 간섭패턴이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 기하학적 빔 모델을 이용하여 상관 전달 손실을 계산한 결과이다. 첫 번째 지층만 존재하는 경우와 이층 구조 바닥의 경우에 서로 비교하였다. 음선 빔은 9~12°의 빔을 사용하였다. Fig. 7(a)와 (c)

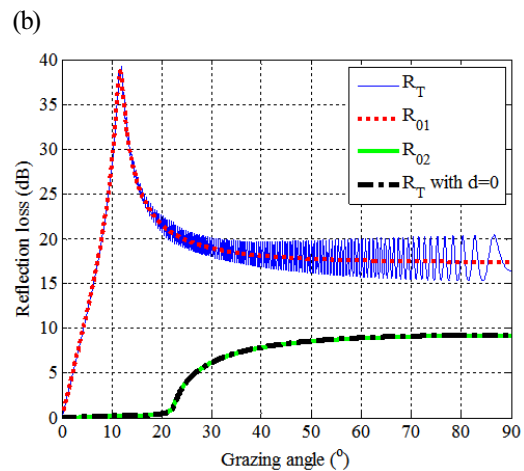
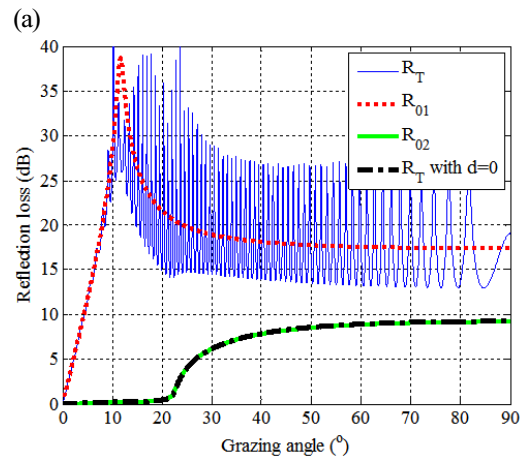


Fig. 6. Reflection loss as a function of grazing angle with the source frequency of (a) 1490 Hz and (b) 3000 Hz.

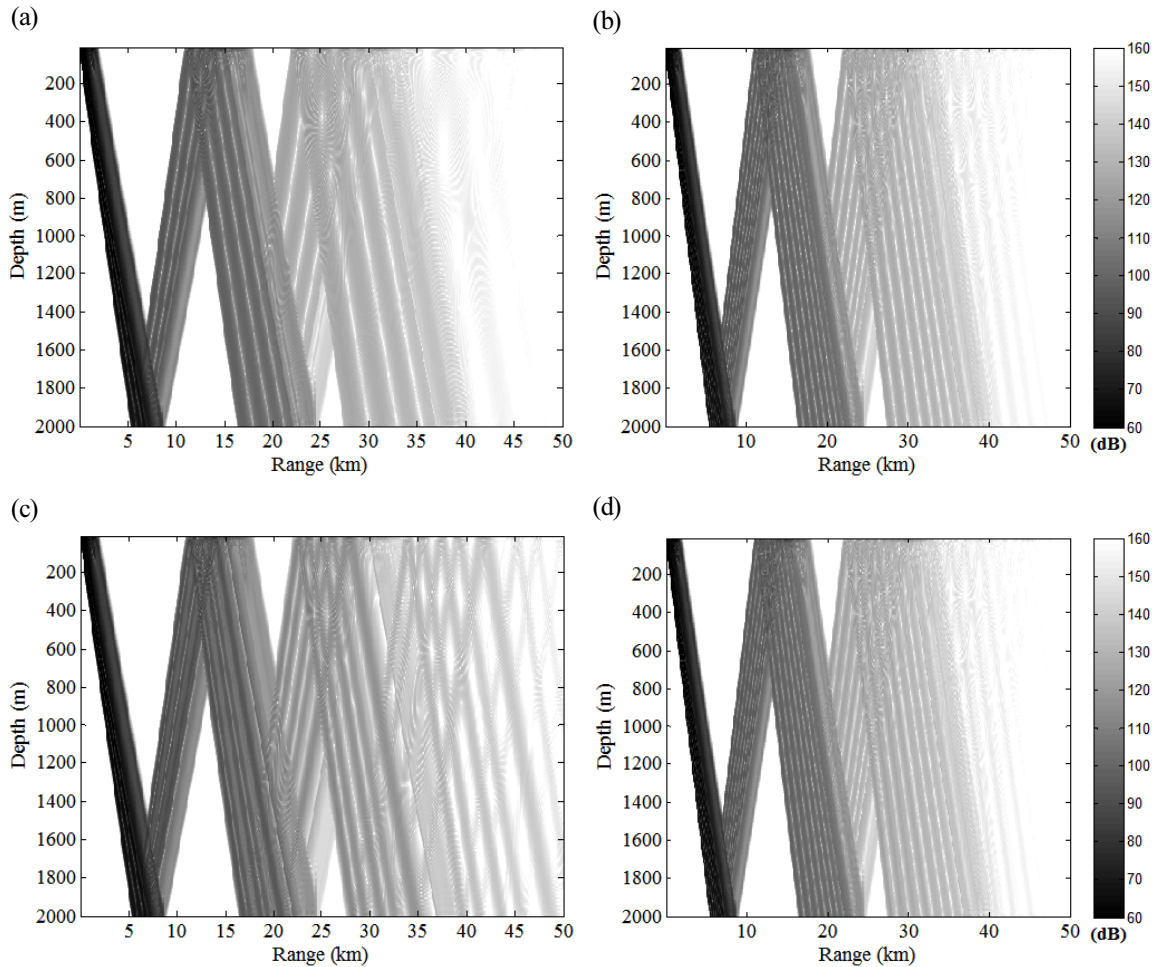


Fig. 7. Coherent transmission losses simulated by the geometrical ray model: (a) with one-layer ocean bottom at 1490 Hz, (b) with one-layer ocean bottom at 3000 Hz, (c) with two-layered ocean bottom at 1490 Hz, (d) with two-layered ocean bottom at 3000 Hz. The unit of colorbar is dB.

를 비교하면, 1490 Hz에서는 이층 구조 바닥의 영향 때문에 전달손실이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 Fig. 6(a)로부터 유추할 수 있다. 음파 에너지가 지배적인 9~12°의 스침각에서 이층 바닥 구조는 단층 바닥보다 적은 반사손실을 보이는 것을 확인할 수 있다. 3000 Hz에서는 예상대로 전달손실에서 큰 변화가 없었다.

Fig. 8은 수신원이 500 m의 깊이에 있다고 생각했을 때 1490 Hz의 음원에 대해 거리에 따른 전달손실을 그린 것이다. 참조하는 포물선방정식 모델인 SNUPE 2.0을 이용하여 얻었다.^[11] SNUPE 2.0은 무지향성 음원에 대해 정확한 상관 전달손실을 계산한다. SNUPE 2.0과의 비교를 위해 기하학적 빔 모델에서도 무지

향성 음원을 가정하고 결과를 구했다. Fig. 8(a)는 첫 번째 지층만 존재하는 경우에 대한 결과이고, Fig. 8(b)는 이층 구조 바닥의 경우에 대한 결과이다. Fig. 8에서 보면 기하학적 빔 모델의 상관 전달손실과 SNUPE 2.0의 상관 전달손실의 에너지 준위는 전체적으로 서로 유사한 것을 볼 수 있다. 국소적으로 5 km, 35 km 등에서 발생하는 크기 오차는 수층의 음영구역을 통한 음파전달에서 기하학적 빔 모델이 음압을 과도하게 예측하기 때문이라는 점을 언급한다. 이것은 음선 기반 모델의 한계 때문에 발생하는 것으로 인위적인 조작을 통해 조정은 가능하나 근원적인 해결은 불가능하다.

본 논문에서 제시한 동해여름환경의 먼 거리 음전

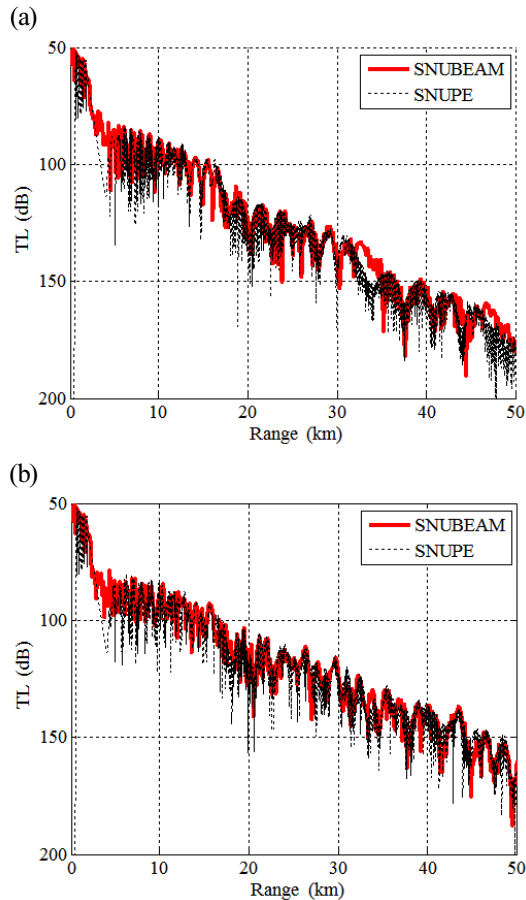


Fig. 8. Comparison of coherent transmission loss calculated by the geometrical ray model and the reference solution obtained by SNUPE 2.0 at the receiver depth of 500 m and the source frequency of 1490 Hz: (a) with one-layer ocean bottom, and (b) with two-layered ocean bottom.

달에서는 Fig. 7에서 보듯이 이층바닥의 효과가 명확하게 드러난다. 하지만 모든 해양 환경에서 이층바닥의 효과가 나타나는 것은 아니다. 서론에서 기술했듯이 중고주파수 이상의 주파수에서 이층바닥의 효과는 매우 제한적이다. 예를 들어 천해인 황해의 겨울환경에서는 수층의 음속구조는 수심에 따라 거의 일정하다. 이 경우에는 모든 음선이 해저바닥과 부딪히며 에너지를 손실하기 때문에, 먼 거리 음 전달에는 0° 근처의 음선만 살아남는다. 만약에 해당 해역이 Fig. 5와 같은 해저바닥 조건을 갖고 있었다면, Fig. 6의 결과로 판단할 때, 전달손실은 이층바닥을 고려하든 안하든 크게 달라지지 않을 것이다.

V. 결론 및 토론

본 연구에서는 이층 구조에 대한 단일 층 가정의 유효성을 이론적으로 증명하고 동해의 여름해양환경에 대해 수치적으로 검증하였다. 단일 층 가정은 먼 거리 음전달이나 해저지층의 두께가 작은 경우 유효성을 갖는다. 단일 층 가정을 사용하는 경우에 추가적으로 소모되는 수치 비용이 거의 없기 때문에, 음선 모델을 이용한 먼 거리 음파전달 모의에 매우 유용할 것이다. 또한 본 연구에서는 이층구조만을 다루었지만, 귀납적으로 다층 구조인 경우에도 단일 층 가정을 적용할 수 있을 것이다.

마지막으로 Eq.(10)이나 본 연구에서 사용한 다층 구조 해저바닥모델은 상관 반사계수 모델이라는 점을 언급한다. 본 연구에서는 상관 반사계수 모델을 상관 음선 모델에 결합시켰으나, 일반적으로 중고주파 소나 성능 분석에는 비상관 음선 모델을 많이 사용한다. 비상관 음선모델에 해저바닥구조를 적용하기 위해서는 비상관 반사계수 모델을 사용해야 할 것이다.

감사의 글

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

References

1. F. B. Jensen, M. B. Porter, W. A. Kuperman, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics, 2nd Edition* (Springer, New York, 2011), pp. 188-189.
2. C. Park, Y. Cho, J. Ahn, and W. Seong, "A study on the ray based broad band modeling for shallow water acoustic wave propagations" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **25**, 298-304 (2006).
3. E. K. Westwood and P. J. Vidmar, "Eigenray finding and time series simulation in a layered-bottom ocean," *J. Acoust. Soc. Am.* **81**, 912-924 (1987).
4. C. Park, W. Seong, P. Gerstoft, and M. Siderius, "Time-domain geoacoustic inversion of high-frequency chirp signal from a simple towed system," *IEEE J. Oceanic Eng.* **28**, 468-478 (2003).
5. J. Dettmer, S. E. Dosso, and C. W. Holland, "Joint

- time/frequency-domain inversion of reflection data for seabed geoaoustic profiles and uncertainties,” *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 1306-1317 (2008).
6. L. M. Brekhovskikh and R. T. Beyer, *Waves in Layered Media, 2nd Edition* (Academic Press, New York, 1980), pp. 225-276.
 7. Jee Woong Choi, “Interpretation of ground wave using ray method in Pekeris waveguide” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **28**, 208-212 (2009).
 8. J. M. Hovem, “Ray trace modeling of underwater sound propagation,” in *Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices*, edited by M. G. Beghi (InTech, Rijeka, 2013).
 9. H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography* (Academic Press, San Diego, 1998), pp. 28-30.
 10. K. Lee and W. Seong, “Hybrid algorithm of the depth solver for wavenumber integration technique in an ocean waveguide with a porous bottom,” *J. Comp. Acous.* **16**, 71-82 (2008).
 11. K. Lee, “2D two-way parabolic equation algorithm using successive single scattering approach” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **25**, 339-345 (2006).

저자 약력

▶ 이 근 화 (Keunhwa Lee)



2000년: 서울대학교 조선해양공학과 학사
 2006년: 서울대학교 조선해양공학과 박사
 2006년~2014: 서울대학교 해양시스템공학
 연구소 연구교수
 2011년~2012년: Visiting scholar, Marine
 Physical Laboratory, SIO, UCSD.
 2014년~현재: 세종대학교 국방시스템
 공학과 조교수

▶ 성 우 제 (Woojae Seong)



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