

천해 음파전달 모의에 적합한 음선기반 광대역 신호 모델링 기법에 관한 연구

A Study on the Ray Based Broad Band Modeling for Shallow Water Acoustic Wave Propagations

박 철 수*, 조 옹 진*, 안 종 우*, 성 우 제**

(Cheolsoo Park*, Yongjin Cho*, Jongwoo Ahn*, Woojae Seong**)

*한국해양연구원 해양시스템안전연구소, **서울대학교 조선해양공학과

(접수일자: 2006년 7월 18일; 수정일자: 2006년 7월 25일; 채택일자: 2006년 8월 10일)

본 논문에서는 천해 음파전달 모의에 적합한 음선기반 광대역 주파수 신호 모의기법을 제안하였다. 본 기법은 깊이에 따라 음속이 선형적으로 변하는 환경 및 층매질에서의 음선추적을 기반으로 평면파 및 구형파의 반사 및 투과, 굴절 그리고 감쇠 등을 고려해 각 고유음선의 위상 및 크기로부터 신호를 모의한다. 본 기법의 가장 큰 특징은 주파수영역을 거치지 않고 시간영역에서 이산화된 신호를 직접 모의함으로써 주파수 대역에 관계없이 계산시간을 단축할 수 있다는 것이다. 끝으로 제안된 기법을 네 가지의 테스트환경에 적용하여 기존의 검증된 모델 (ORCA, Ram)의 결과와 비교하여 그 효용성을 검증하였다.

핵심용어: 음선기반 음파전달 모델링, 천해 음파전달, 광대역 주파수 신호, 시간영역 모의.

투고분야: 수중음향분야 (5.1)

This paper proposes a ray-based forward modeling scheme which is suitable for the shallow water acoustic wave propagation simulations. The proposed model comprises of ray tracings for the layered media of which sound speed profiles are interpolated linearly, considerations of plane and spherical wave reflection coefficients, and calculations of the phases and the amplitudes of eigen rays. The main characteristic of the scheme is fast simulation time due to direct calculation of the broad-band time signals in the time-domain, i.e. without transformation of the frequency-domain solutions to the time signals. Finally, we applied the model to 4-types of test environments and compared the resulting signals with those of ORCA and Ram in order to validate the proposed model.

Key words: Ray-based modeling, Shallow water acoustic propagation, Broad-band time signal, Time-domain modeling.

ASK subject classification: Underwater Acoustic (5.1)

I. 서 론

최근 해양에서 광대역 음향신호 (broad-band acoustic signals)의 활용이 빈번해지고 있다. 이에 따라 광대역 신호의 모델링 또한 관심의 대상이 되고 있는데, 신호 모델링은 해양환경 탐사, 지음향학적 인자 역산, 수중 데이터 통신, 소나시스템을 위한 신호처리 기법 연구,

소나 시뮬레이션 등 그 응용범위가 확대되고 있는 실정이다.

수중에서 광대역 음향신호를 모의하기 위해서는 주어진 환경에서의 시간영역 파동방정식을 풀거나 주파수영역의 Helmholtz 방정식의 해를 구한 후 이를 시간영역으로 변환하여야 한다. 일반적으로 복잡한 환경을 가지는 해양에서의 해는 수치적인 방법으로 구할 수 있다. 널리 알려진 수치해법으로는 음선이론, 파수적분법, 정상모드법, 포물선방정식법, 유한요소법 그리고 유한차분법 등이 있다 [1]. 그러나 대부분의 수치해법은 주파수대역이

넓어지고 중심주파수가 높아지면 계산시간의 증가로 인해 실용적이지 못하므로 더욱 효율적인 수치해석기법이 요구되고 있다.

음선이론을 바탕으로 한 음파전달 모델은 오랫동안 수중음향학에서 널리 사용되었다. 그러나 저주파영역에서는 잘 맞지 않는 한계 등으로 인해 최근에는 활용도가 다소 떨어지는 경향을 보이기도 하였다. 그러나 모델의 정확성만을 따지기에는 해양환경 자체의 불확실성이 워낙 큰데다가 빠른 계산속도 등의 실용성과 음파전달의 물리적 현상에 대한 통찰에 용이한 점 등으로 인해 음파전달 모델에서 중요한 위치를 차지한다. 전통적인 광학 음선이론에서는 Helmholtz 방정식의 해를 음선급수(ray series)로 가정 한 후 고주파 근사를 통해 음선의 위상을 결정하는 eikonal 방정식과 음장의 크기를 결정하는 transport 방정식에 다양한 수치해법을 적용하여 전체 음장을 계산한다. 그런데 음선이론에서는 반사와 투과가 동시에 발생하는 해저면의 경우 하나의 음선이 다수의 음선으로 분리됨에도 불구하고 투과되는 성분은 무시하여 하나의 음선에 대해서만 고려하는 것이 일반적이었다. 이러한 기법은 해저면과의 상호작용이 상대적으로 적은 심해에서는 유용하나 다중반사가 지배적인 천해에서의 적용에는 적합하지 않다. 그러므로 해저지층에서 투과 및 반사되어 여러 개의 음선으로 나뉠 때 모든 음선을 추적할 수 있는 수치해법의 개발이 필요하다.

이에 본 논문은 천해환경에 적합한 효율적인 광대역 음향신호 모의기법의 개발을 목적으로 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 모델링 기법에 대해 설명하고, 제 3장에서 다양한 천해환경에 적용한 후 그 결과를 기존의 알려진 수치해법을 이용한 모의결과와 비교하여 제안된 기법의 효용성을 검증한다. 끝으로 제 4장에서 본 논문의 결론을 맺기로 한다.

II. 모델링 기법

다음과 같은 선형음속구조 구간을 고려하자.

$$c(z) = c(z_1) + a(z - z_1) \quad \text{for } z_1 \leq z \leq z_2 \quad (1)$$

식 (1)에서 $c(z_1)$ 은 깊이 z_1 에서의 음속이며 a 는 음속의 기울기를 의미한다. Snell의 법칙에 따르면 식 (1)의 선형 음속구조에서 음파는 $\frac{c(z_1)}{a \sin(\theta_1)}$ 이 반지름인 원을 따라

진행하며, 임의의 시작점 z_i 와 끝점 z_f 사이의 음파의 진행 거리 및 시간은 각각 다음과 같다[2].

$$L_{i-f} = \frac{c(z_1)}{a \sin(\theta_1)} (\cos(\theta_i) - \cos(\theta_f)) \quad (2)$$

$$t_{i-f} = \frac{1}{a} \log_e \frac{(z_f - z_1 + c(z_1)/a)(1 + \cos(\theta_i))}{(z_i - z_1 + c(z_1)/a)(1 + \cos(\theta_f))} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 θ 는 수평면의 법선을 기준으로 한 입사각 (incident angle)이며, 첨자 i 와 f 는 각각 음선에서의 시점과 종점을 의미한다. 음속이 수직으로 균일한 구간, 즉 $a=0$ 인 구간에서는 식 (2)와 (3)의 적용이 불가능하다. 그러나 이 경우 음파는 직선으로 진행하므로 진행 거리와 시간은 손쉽게 계산될 수 있다. 다수의 서로 다른 기울기의 음속구조로 이루어진 매질의 경우 기울기가 변하는 경계를 각각 시점과 종점으로 하여 식 (2)와 (3)을 반복 적용하면 전체 음파의 진행 거리 및 시간을 구할 수 있다.

산란현상을 무시할 정도로 거칠기가 작은 서로 다른 매질의 경계면에 음선이 도달하면 반사와 투과에 의해 두 개의 음선으로 분리되며 각 음선의 전파방향과 크기는 매질의 특성에 따라 변하게 된다. 이 때 경계면에서의 두 매질의 음속이 서로 다르다면 분리된 음선, 즉 반사파와 투과파의 전파각은 경계면을 기준으로 다음과 같다 [2].

$$\theta_{branch} = \begin{cases} \theta_{original}, & \text{if reflected} \\ \sin^{-1} \left(\frac{c_{branch}}{c_{original}} \sin(\theta_{original}) \right), & \text{if transmitted} \end{cases} \quad (4)$$

한편 분기된 음선의 크기는 평면파의 경우 다음의 반사계수와 투과계수에 의해 결정된다[2].

$$A_{branch} = \begin{cases} \frac{\rho_{trans} c_{trans} \cos(\theta_{trans}) - \rho_{inc} c_{inc} \cos(\theta_{inc})}{\rho_{trans} c_{trans} \cos(\theta_{trans}) + \rho_{inc} c_{inc} \cos(\theta_{inc})}, & \text{if reflected} \\ \frac{2 \rho_{trans} c_{trans} \cos(\theta_{trans})}{\rho_{trans} c_{trans} \cos(\theta_{trans}) + \rho_{inc} c_{inc} \cos(\theta_{inc})}, & \text{if transmitted} \end{cases} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서 c 와 ρ 는 각각 매질의 음속과 밀도를 의미한다. 음원에서부터 청음기가 위치한 거리에 이르기 까지 전파과정에서 하나의 음선이 두 개로 분리되는 모든 분기점은 추적되고 저장된다. 만약 음선이 청음기의 위치에서 미리 결정되어 있는 오차범위 안에 도달한다면 이를 고유음선으로 판단한다. 본 고유음선 탐색과정은 다음과 같다.

i) 음원으로부터의 초기 전파각을 $\Delta\theta$ 만큼 증가시키면서 모든 분기된 음선을 추적한다.

ii) 청음기 위치를 기준으로 인접한 두 초기 전파각 θ_i 와 θ_{i+1} 에 해당하는 음선이 도달한 깊이 z_i 와 z_{i+1} 가 청음기를 기준으로 서로 반대되는 위치에 있을 때까지 i)의 과정을 반복한다.

iii) ii)의 과정에 의해 탐색된 두 전파각을 경계로 하여 음선의 위치가 오차범위 안에 들어올 때까지 $\Delta\theta$ 의 크기를 줄이면서 탐색을 진행한다. 이 때 $\Delta\theta$ 의 크기와 탐색의 방향은 황금분할[3]에 의해 결정된다.

iv) 위 과정을 모든 고유음선을 찾을 때까지 반복 수행한다.

각 고유음선은 전파과정에서 에너지의 손실을 겪는다. 이 때 손실은 기하학적 확산 (spherical spreading)에 의한 손실과 감쇠 (attenuation)에 의한 손실로 나눌 수 있다. 기하학적 확산에 의한 손실계수 $C_{spreading}$ 와 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_{spreading} = 1/L_{tot} \tag{6}$$

식 (6)에서 L_{tot} 은 음원으로부터 청음기까지 각 음선이 전파한 거리를 의미한다. 한편 감쇠에 의한 손실계수 C_{atten} 는 주파수에 따라 달라지는데, 음파의 감쇠가 주파수 f 에 선형적으로 비례한다고 가정하면 다음과 같이 정의된다 [1].

$$C_{atten}^i(f) = \exp\left(-\frac{\alpha'}{40\pi \log e} k' L_{branch}^i\right) \tag{7}$$

식 (7)에서 α' (단위: dB/λ)와 k' 는 각 매질에서의 감쇠계수와 파수 (wavenumber)를 각각 의미하며, L_{branch}^i 는 해당 매질에서 분기된 음선의 다음 분기점까지의 전파거리이다. 따라서 하나의 고유음선의 최종 크기는 다음과 같이 계산된다.

$$A_{eigen}^i = C_{spreading} \prod_{i=1}^{N_{branch}} C_{atten}^i A_{branch}^i \tag{8}$$

식 (8)에서 N_{branch} 는 분기점의 개수를 의미한다. 위의 과정에 의해 구해진 모든 고유음선의 크기와 위상정보를 바탕으로 주파수응답 $H(f)$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H(f) = \sum_{i=1}^{N_{eigen}} A_{eigen}^i \exp(-i2\pi f \tau_{total}^i) \tag{9}$$

식 (9)에서 N_{eigen} 은 고유음선의 개수이며, τ_{total}^i 는 각 고유음선의 음원으로부터 청음기까지의 전파시간을 의미한다.

시간응답 $h(t)$ 는 두 가지 방식으로 구할 수 있다. 식 (9)의 주파수응답을 구한 후 푸리에 변환 (Fourier Transform)을 적용하거나, 또는 시간영역에서 해를 바로 구하는 것이다. 한편, 음향실험에 의해 획득된 데이터는 이산화하여 활용하는 것이 일반적이다. 따라서 모델링 결과 또한 실측 데이터의 샘플링 주파수와 동일하게 이산화되어야 함에 유의한다.

우선, 식 (9)의 이산화된 푸리에 변환에 의한 시간응답은 다음과 같다 [1].

$$\sum_n h(r, z, t, +nT) = 2\pi f \operatorname{Re} \left(\sum_{i=1}^{N_{eigen}} [H(r, z, f) \exp(i2\pi n \tau_{total}^i f)] \exp(i2\pi n j / N) \right) \tag{10}$$

식 (10)에서 N 은 주파수 및 시간 샘플의 개수이며 T 와 t_{min} 은 각각 시간 범위와 시작되는 시간을 의미한다. 또한 Δf 는 주파수의 샘플 간격이며 시간영역 샘플 간격 Δt , 혹은 샘플링 주파수 f_s 와는 $f_s = 1/\Delta t = N\Delta f$ 의 관계를 갖는다. 식 (10)의 좌변은 연속 신호의 이산화에 따른 신호접침 (aliasing)을 의미한다. 샘플링 이론에 따르면 신호접침을 방지하기 위해서는 샘플링 주파수는 적어도 최대 주파수의 두 배보다 커야 한다 [1].

만약 식 (7)의 감쇠에 의한 손실계수의 주파수 의존성이 크지 않거나 협대역 신호의 경우 손실계수는 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$C_{atten}^i = \exp\left(-\frac{\alpha'}{40\pi \log e} k'_o L_{branch}^i\right) \tag{11}$$

식 (11)에서 k'_o 는 중심주파수에서의 파수이다. 또한 평면파 반사의 경우 반사 및 투과 계수의 주파수 의존성이 없으므로 임의의 고유음선에 대한 무한 연속 시간응답은 푸리에 변환으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$h^i(t) = \operatorname{Re} \left(\int_{-\infty}^{\infty} A_{eigen}^i \exp(i2\pi f (t - \tau_{total}^i)) df \right) = \operatorname{Re}(A_{eigen}^i) \delta(t - \tau_{total}^i) \tag{12}$$

식 (12)에 대응되는 유한한 길이의 이산 시간응답은

$$h^k(t_j) = \text{Re} \left(\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} A_{\text{refl}}^k \exp(i2\pi f(t_j - \tau_{\text{total}}^k)) df \right) / (f_{\max} - f_{\min}) \quad (13)$$

이다. 모든 고유음선에 대해 식 (13)의 적분을 수행하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$h^k(t_j) = \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} \sum_{\text{refl}} A_{\text{refl}}^k \left[\frac{\sin(2\pi f_{\max} (t_j - \tau_{\text{total}}^k) + \phi)}{\pi(t_j - \tau_{\text{total}}^k)} - \frac{\sin(2\pi f_{\min} (t_j - \tau_{\text{total}}^k) + \phi)}{\pi(t_j - \tau_{\text{total}}^k)} \right] \quad (14)$$

식 (14)에서 $|A_{\text{refl}}^k|$ 와 ϕ_k 는 각각 A_{refl}^k 의 크기와 위상을 의미한다. 식 (14)를 이용하면 주파수영역의 해를 구할 필요 없이 시간영역에서 직접 시간응답을 계산할 수 있다. 따라서 본 시간응답 모델링 기법은 푸리에 변환을 통한 모델링보다 계산시간을 단축할 수 있는 장점이 있다.

식 (5)에서는 음선의 크기를 계산하는데 평면파 반사를 가정하였다. 그러나 실제 음파는 평면파가 아닌 구형파이다. Brekhovskikh [4]는 구형파를 평면파의 적분으로 표현한 뒤 반사파 (reflected wave)와 측면파 (lateral wave)로 구분하여 각 성분의 크기를 해석적으로 유도한 바 있다. Brekhovskikh는 구형파 특성은 입사각과 임계각과의 차이가 크지 않은 경우에 두드러지며, 두 각의 차이가 크거나 반사면으로부터 원거리의 경우 평면파의 특성을 보임을 밝혔고, 입사각과 임계각이 거의 일치하는 경우의 반사계수를 유도하였다. 본 논문에서는 Brekhovskikh의 유도를 바탕으로 구형파 반사계수를 급수전개 (series expansion)로 표현해 입사각과 임계각과의 차이 범위를 확장해 음선기반 모델링에 적용하였다. 한편 측면파는 임계각 이후의 반사에서 발생하는 현상으로 beam displacement에 따른 caustic의 발생 가능성 등, 음선 모델에서는 적용의 어려움이 있으므로 음선을 기반으로 하는 현 모델에서는 포함하지 않았음을 밝힌다.

그림 1과 같이 점 O의 음원에 의한 위치 A에서의 음압 P는 직사파 P_r와 반사파 P_s의 합으로 구성된다. 이 때 반사파는 식 (15)와 같이 평면파의 합으로 표현될 수 있다.

$$P_r = \frac{ik}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} e^{ik(r \sin \theta \cos(\phi - \theta_0) + (z - z_0) \cos \theta)} R(\theta) \sin \theta d\theta d\phi \quad (15)$$

식 (15)에서 R(θ)는 그림 1의 경계면에 대한 평면파 반사계수로써, 편의상 이를 다시 쓰면 식 (16)과 같다.

$$R(\theta) = \frac{m \cos(\theta) - \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}}{m \cos(\theta) + \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}} \quad (16)$$

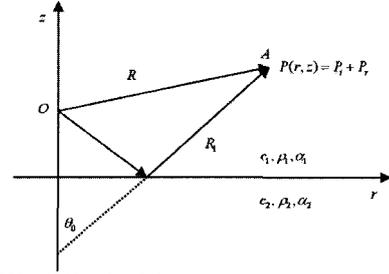


그림 1. 구형파 반사 도식도(4)
Fig. 1. Geometry of spherical wave reflection.(4)

식 (16)에서 m과 n은 밀도와 음속의 비로 각각 ρ_2 / ρ_1 와 c_1 / c_2 이다.

식 (15)의 방위각 (azimuth angle) ϕ 에 대한 적분은 Hankel 함수로 표현되고, Hankel 함수의 원거리 근사를 통해 식은 다음과 같이 표현된다.

$$P_r = \sqrt{\frac{k}{2\pi r}} e^{in/4} \int_{-\pi/2 + i\infty}^{\pi/2 - i\infty} e^{ikR \cos(\theta - \theta_0)} R(\theta) \sqrt{\sin(\theta)} d\theta \quad (17)$$

식 (17)의 적분경로에 따라 전체 반사파는 반사와 측면파 등 두 성분으로 나뉘지며, 본 모델에서는 반사성분만을 고려함에 유의한다. 만약 입사각 θ_0 가 임계각 γ 에서 크게 벗어나는 경우 즉, $|\theta_0 - \gamma| / \theta_0 \gg 0$ 이라면 식 (16)는 Steepest Descent법을 적용해 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$P_r \approx \left(R(\theta_0) - i \frac{R(\theta_0) + R(\theta_0) \cot(\theta_0)}{2kR} \right) \frac{e^{i\theta_0 R}}{R}, \quad \text{when } |\theta_0 - \gamma| / \theta_0 \gg 0 \quad (18)$$

식 (18)로부터 앞에서 언급하였듯이 입사각과 임계각의 차이가 크거나, 음원 혹은 청음기 위치가 경계면에서 먼 경우 구형파는 평면파로 근사 될 수 있음을 알 수 있다. 한편 입사각과 임계각의 차이가 작은 경우에는 Steepest Descent법을 적용할 수 없다. 이 경우에는 다음과 같이 다른 방법으로 적분을 수행한다.

식 (16)의 평면파 반사계수는 다음과 같이 전개될 수 있다.

$$R(\theta) \approx 1 + 2 \sum_{j=1}^{\infty} (-\sigma)^j, \quad \left| \sigma = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}}{m \cos(\theta)} \right| < 1 \quad (19)$$

또한 $\beta = \gamma - \theta$ 의 변수치환 후 σ 와 $\sqrt{\sin(\theta)}$ 의 테일러 전개 (Taylor Expansion)를 통해 식 (17)의 적분항 $R(\theta) \sqrt{\sin(\theta)}$ 은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$R(\theta)\sqrt{\sin(\theta)} \approx \sqrt{\sin(\gamma)} + \sum_{i=1}^{\infty} C_i (\sin(\beta))^i \quad (20)$$

만약 β 가 작을 경우, 즉, 입사각과 임계각이 거의 일치한다면 식 (20)의 급수 중 첫 제 항만 의미가 있고, Brekhovskikh의 유도는 이 경우에 해당한다. 그러나 급수의 차수를 증가시키면 실제 모델링에 적용 가능한 유효한 범위를 확장할 수 있을 것이다. 식 (20)의 초기 3개 급수의 상수는 각각

$$C_1 = \frac{-2\sqrt{2}\sin(\gamma)}{m\sqrt{\cos(\gamma)}}, C_2 = \frac{-\sqrt{2}\sin(\gamma)}{m\sqrt{\cos(\gamma)}}, C_3 = \frac{1}{2}\sqrt{2}\sin(\gamma)\cos(\gamma), C_4 = \left(-\frac{1}{2}\cos(\gamma) - \tan(\gamma) + \frac{2\sin(\gamma)}{m'\cos(\gamma)}\right)C_1$$

과 같다.

한편 식 (17)의 적분에는 다음의 항등식을 이용한다.

$$\frac{1}{\Gamma(-n)} \int_0^{\infty} \exp\left[\frac{i}{2}(\xi^2 - \eta^2)\cos(\beta) - i\xi\eta\sin(\beta)\right] \times \left(i \tan\left(\frac{\beta}{2}\right)\right)^{-n} \frac{d\beta}{2\sin(\beta/2)} = D_n(\xi - i\eta) D_n(\eta + i\xi), \quad -\pi/2 < \beta < \pi/2 \quad (21)$$

이 때 $D_n(x)$ 는 Weber함수[5]이다. 식 (20)을 식 (17)에 대입하고, $\xi = \sqrt{2kR} \cos((\theta_0 - \gamma)/2)$ 와 $\eta = \sqrt{2kR} \sin((\theta_0 - \gamma)/2)$ 의 변수변환을 수행하면 식 (21)의 항등식에 의해 식 (17)은 식 (22)로 최종 표현된다.

$$P_r \approx \frac{\exp(i\theta R)}{R} + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\frac{C_i 2^{i/2}}{i^{i/2}} \sqrt{\frac{k}{2\pi}} \exp\left(i\frac{\pi}{4}\right) \Gamma\left(\frac{i}{2} + 1\right) D_{i/2,1}(\xi - i\eta) \times \{\pm D_{i/2,1}(\eta + i\xi) + D_{i/2,1}(-\eta - i\xi)\} \right] \quad (22)$$

식 (22)에서 +, - 사인은 각각 입사각이 임계각보다 크거나 작을 때에 해당한다. 따라서 기하학적 확산과 전파에 의한 위상변화를 고려하면 구형파 반사계수는 $R_r = p_r / (\exp(i\theta R) / R)$ 임을 알 수 있다.

본 모델에서는 $|\alpha| < 1$ 의 영역에서는 구형파 반사계수 R_r 를 사용하였고, 이 외의 영역에서는 식 (5)의 평면파 반사계수를 사용하였다. 본 구형파 반사계수의 적용범위는 모델링을 통해 합리적인 것으로 판단되었다.

III. 음파전달 모델링 기법 검증

본 논문에서 제안된 모델링 기법의 효용성을 검증하기 위해 이미 검증된 모델의 결과와 비교하였다. 시간영역 신호는 주파수 영역 모델링을 거치지 않고 식 (14)를 이용해 시간영역 해를 직접 구하였으며, 비교대상 모델은 정상모드법의 일종인 ORCA [6]와 포물선 방정식법의 일

종인 Ram [7]을 사용하였다. 두 비교모델은 거리독립 환경과 거리종속 환경에 한해 각각 사용되었으며, 시간영역 신호모의를 위해 주파수 응답을 구한 후 식 (10)을 적용하였다. 테스트환경은 수층의 음속이 균일한 반무한 거리독립 환경, 수층의 음속이 균일한 층매질 환경, 수층의 음속이 깊이 방향으로 선형적으로 변하는 반무한 거리독립 환경, 그리고 수심이 감소하는 반무한 거리종속 환경 (upslope) 등 네 종류로 설정하였다. 이 때 음원 신호는 100~600Hz 대역의 광대역 신호이고 샘플링 주파수는 0.7324Hz이다.

테스트 환경1은 그림 2 (a)와 같이 수층의 음속이 1500m/s로 일정한 수심 100m 반무한 환경이다. 음원과 청음기의 위치는 공히 수심 50m이며 서로 1km 떨어져 있으며, 반무한 층의 음향인자는 그림과 같다. 본 테스트의 목적은 단순한 환경에서 구형파 반사의 영향을 살

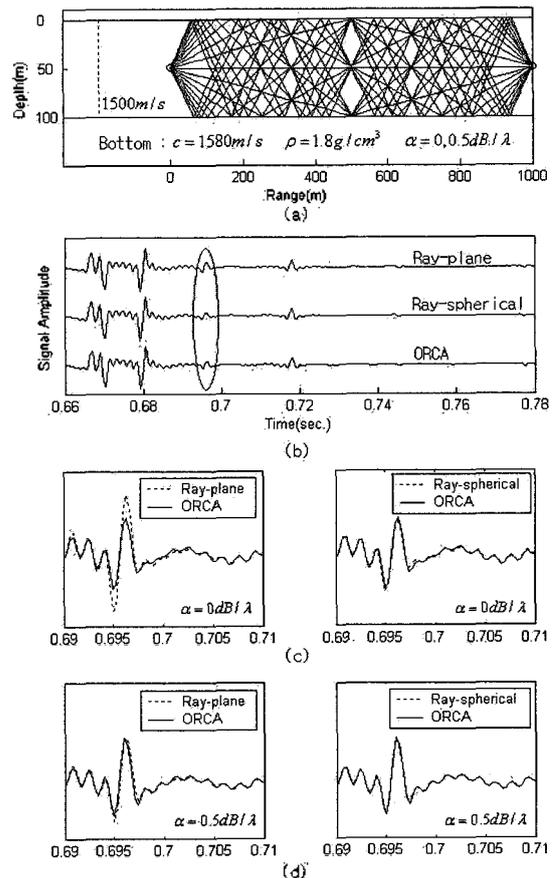


그림 2. 테스트 1 결과. (a)환경 및 고유음선, (b)도달신호 비교, (c)입사각이 임계각과 비슷한 반사성분 비교($\alpha = 0dB/\lambda$), (d)입사각이 임계각과 비슷한 반사성분 비교($\alpha = 0.5dB/\lambda$)

Fig. 2. Results for test 1: (a)environment and eigen rays, (b)comparison of time signals, (c)comparison of signals whose incident angles are near the critical angle($\alpha = 0dB/\lambda$), (d)comparison of signals whose incident angles are near the critical angle ($\alpha = 0.5dB/\lambda$).

퍼보는데 있다. 테스트환경1에서의 고유음선과 각 모델의 음향신호는 각각 그림 2 (a)와 (b)에 나타나 있다. 그림 2 (b)로부터 음선기반 모델과 ORCA의 결과는 원으로 표시된 신호를 제외하면 완전히 일치함을 확인할 수 있다. 원 안의 신호는 입사각이 본 환경의 임계각인 71.7° 에 근접한 두 고유음선에 의한 신호성분으로 분석되었는데, 이 때 입사각은 73.3° 이며 식 (21)의 η 는 약 0.71이다. 그림 2 (c)는 지층의 감쇠계수 α 가 $0.5dB/\lambda$ 인 경우 신호를 확대하여 비교한 결과이고, 그림 2 (d)는 α 가 $0.5(dB/\lambda)$ 인 경우를 비교하여 보여준다. 그림으로부터 감쇠가 없는 경우 입사각이 임계각에 근접하는 경우 평면파 근사는 오차가 발생함을 알 수 있다. 그러나 이러한 오차는 감쇠가 있는 매질에서는 그림 2 (d)에서와 같이 급격히 감소한다. 구형파와 평면파의 반사성분의 차이는 evanescent wave에 기인하며 그 영향은 임계각 근처 ($\eta=0$)에서 가장 크다. 그런데 evanescent wave는 매질에서 전파가 안되고 급속히 감쇠되는 성질이 있다. 그러므로 경계면에서 거리가 멀어질수록 evanescent wave의 영향은 급속히 줄어드는데 특히 매질자체의 감쇠가 있는 경우 그 정도는 더 심해진다. 따라서 이 경우 임계각 근처에서도 평면파 반사 특성을 보이는 것이다.

테스트환경2는 그림 3 (a)와 같이 하나의 퇴적층으로 이루어진 층매질로 구성되었다. 고유음선과 각 모델의 모의신호는 각각 그림 3 (a) 및 3 (b)와 같다. 본 테스트와 이후의 테스트에서 음선기반 모델은 구형파 반사를 고려하였다. 음선기반 모델과 ORCA의 모의결과는 잘 일치하며 이로부터 본 음선기반 모의기법이 층매질 환경에 적용 가능함을 확인하였다.

테스트환경 3은 수층의 음속변화에 의한 굴절(refraction)현상이 발생하는 경우를 살펴보기 위해 그

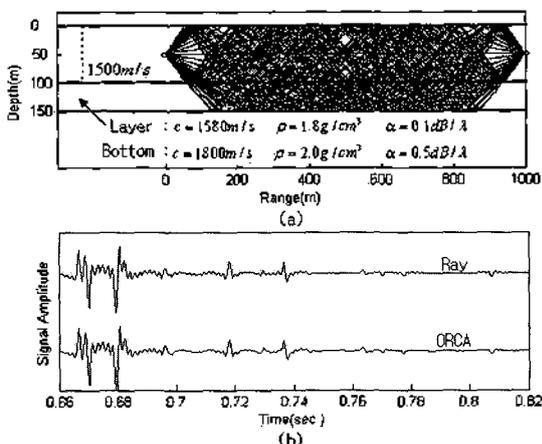


그림 3. 테스트 2 결과. (a)환경 및 고유음선, (b)도달신호 비교
Fig. 3. Results for test 2: (a)environment and eigen rays, (b)comparison of time signals.

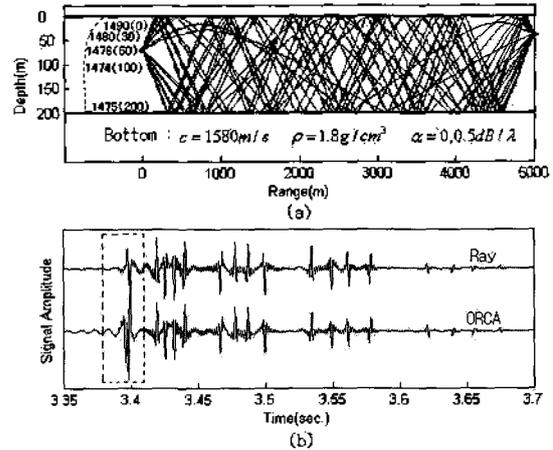


그림 4. 테스트 3 결과. (a)환경 및 고유음선, (b)도달신호 비교
Fig. 4. Results for test 3: (a)environment and eigen rays, (b)comparison of time signals.

림 4 (a)와 같이 구성되었다. 음원과 청음기는 각각 수심 70m 40m에 위치하고 있으며 서로 5km 떨어져 있는 수심 200m 반무한 도파관 환경이다. 수층의 음속구조는 전형적인 하방굴절 (downward refracting) 구조이며 깊이별 음속은 그림 4 (a)의 왼편에 나타나 있다. 본 음선기반 모델은 음속이 깊이에 따라 선형적으로 변할 때 음선을 추적하는 방식이다. 그러나 비교모델인 ORCA를 비롯해 많은 모델링 기법이 비선형 음속변화 ($1/c^2$ linear)를 기반으로 계산을 수행한다. 따라서 두 모델을 비교할 때 이에 의한 오차가 발생할 수 있으므로 음속의 변화 기울기가 큰 경우 다수의 내삽점 (interpolation point)를 추가해야 할에 유의하여야 한다. 음선 추적결과는 그림 4 (a)의 오른편과 같다. 고유음선을 살펴보면 음원으로부터의 입사각이 큰 경우 굴절현상이 현저함을 알 수 있다. 한편 그림 4 (b)의 신호를 비교할 때 신호의 전단부 (사각박스 내)에서 두 모의신호의 상관도가 떨어짐을 알 수 있다. 이는 음선기반 모델이 음의 굴절현상에 의한 위상변화를 반영하지 못했기 때문이다. 이러한 오차는 굴절을 반영하지 않는 음선모델에서 공통적으로 발생하는 현상이며 [8], 본 모의기법에서 추후 개선되어야 될 사항으로 판단된다. 그러나 굴절의 영향이 큰 신호성분을 제외하고는 두 모델의 신호도달 구조 등 상관도가 높음을 알 수 있다.

테스트환경 4는 수심이 200m에서 100m로 줄어드는 것을 제외하고는 테스트환경 3과 동일하다. 본 환경은 대표적인 거리종속 환경으로서 비교모델로는 split-step Pade기법을 적용한 Ram을 사용하였다. 그림 5 (a)와 5 (b)는 각각 고유음선 추적결과와 모의신호를 보여준다. 두 모델에 의한 모의신호 역시 테스트 3에서와 같이 굴

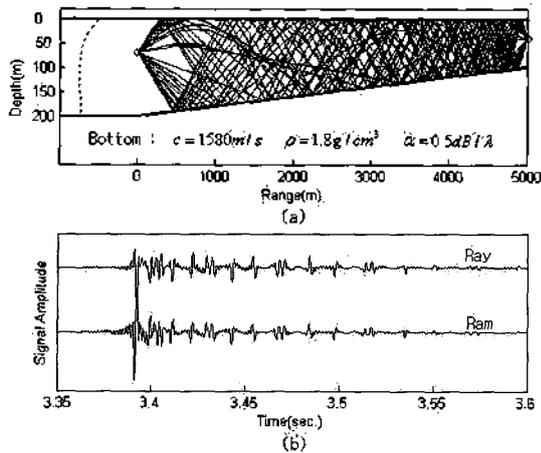


그림 5. 테스트 4 결과. (a)환경 및 고유음선, (b)도달신호 비교
 Fig. 5. Results for test 4: (a)environment and eigen rays, (b)comparison of time signals.

결현상에 의한 오차를 제외하고는 전반적인 신호도달 구조는 유사함을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 천해 음파전달 모의에 적합한 음선기반 광대역 주파수 신호 모의기법을 제안하였다. 본 기법은 깊이에 따라 음속이 선형적으로 변하는 환경 및 층매질에서의 음선추적을 기반으로 평면파 및 구형파의 반사 및 투과, 굴절 등을 고려해 각 고유음선의 위상 및 크기로부터 신호를 모의하였다. 제안된 기법을 네 가지의 테스트환경에 적용하여 기존의 검증된 모델 (ORCA, Ram)의 결과와 비교하여 그 효용성을 검증하였다.

본 기법의 가장 큰 특징은 주파수영역을 거치지 않고 시간영역에서 이산화된 신호를 직접 모의함으로써 주파수 대역에 관계없이 계산시간을 단축할 수 있다는 것이다. 이러한 장점은 특히 거리중속 환경에서 두드러지는데, 계산시간이 긴 포물선방정식 등의 거리중속모델을 대체할 수 있기 때문이다. 다만 굴절현상에 따른 위상변화에 의한 오차를 개선할 수 있도록 후속 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국해양연구원의 기본연구사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

1. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational ocean acoustics* (AIP Press, NY, 1994).
2. C. S. Clay and H. Medwin, *Acoustical Oceanography* (John Wiley & Sons, NY, 1997).
3. W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical recipes in C* (Cambridge University Press, New York, 1995).
4. L. M. Brekhovskikh, *Waves in layered media* (Academic Press, New York, 1980).
5. E. T. Whittaker and G. N. Watson, *A course of modern analysis* (Cambridge University Press, New York, 1962).
6. E. K. Westwood, C. T. Tindle, and N. R. Chapman, "A normal-mode model for acousto-elastic ocean environments," *J. Acoust. Soc. Am.* 100, 3631 (1996).
7. M. D. Collins, "A split-step Pade solution for the parabolic equation method," *J. Acoust. Soc. Am.* 93, 1736 (1993).
8. F. B. Jensen, C. M. Ferla, P. L. Nielsen, and G. Martinelli, "Broadband signal simulation in shallow water," *J. Comp. Acoust.* 11 (4) 557-591 (2003).

저자 약력

• 박철수 (Cheolsoo Park)



1997년: 서울대학교 조선해양공학과(학사)
 1999년: 서울대학교 조선해양공학과(석사)
 2003년: 서울대학교 조선해양공학과(박사)
 2004년~현재: 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 선임연구원
 ※주관심분야: 수중음향, 수중소음, 함정특수수능

• 조용진 (Yongjin Cho)



1988년: 인하대학교 조선공학과(학사)
 1990년: 인하대학교 조선공학과(석사)
 1990년~1994년: 해군본부 조함단 중위
 2005년: 충남대학교 조선해양공학과(박사)
 1994년~현재: 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 선임연구원
 ※주관심분야: 특수선설계, 함정시스템기술, 적외선신호

• 안종우 (Jongwoo Ahn)



1983년: 한양대학교 기계공학과(학사)
 1985년: 과학기술원 기계공학과(석사)
 1996년: 과학기술원 기계공학과(박사)
 1985년~현재: 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 책임연구원
 ※주관심분야: 캐비테이션 소음, 난류유동

• 상우재 (Woojae Seong)

한국음향학회지 제23권 제9호 참조