

거리의존 해양환경에서의 수중음파전달 모델에 대한 benchmark 시험

성우제*, 김국현**, 김태훈**

(인하대 선박해양공학과*, 인하대 대학원**)

요 약

수중음파전달 모델은 benchmark 시험을 통해 정확도, 적용범위, 계산시간 등의 성능을 평가받는다. 본 논문에서는 analytic 모델, 정상 모드 모델(normal mode model), 포물선 방정식 모델(parabolic equation model), 가우시안 빔 모델(Gaussian beam model), 스펙트럴 모델(spectral model) 등 거리 의존 모델에 대해 benchmark 시험을 수행하였으며, benchmark 시험은 다음과 같은 세가지 거리 의존 해양환경으로 나누어 실시했다: 1) 해수면과 해저면이 Dirichlet 경계조건인 이상 쐐기 문제(ideal wedge problem), 2) 해수면은 앞서 말한 Dirichlet 경계조건이나 해저면은 전달 손실이 있는 손실 통과 해저면 쐐기 문제(penetrable lossy bottom wedge problem), 3) 해수면은 앞서 말한 Dirichlet 경계조건이고 해저면은 Neumann 경계조건으로 서로 평행이며 음파전달 속도가 거리방향 의존인 경우. 경우 1은 analytic 모델을 사용하고 경우 2는 정상 모드 모델, 포물선 방정식 모델, 스펙트럴 모델을 사용하였으며, 경우 3에 대해서는 가우시안 빔 모델과 포물선 방정식 모델을 사용하였다.

서 론

수중음파전달 모델은 최근 몇 년간 컴퓨터의 발달과 더불어 거리 독립 문제 뿐 아니라 거리 의존 문제에 있어서도 급속도로 발달하였으며, 특히 새로운 해석기법이 도입되고 여러 효율적인 해석기법들을 혼용하여 그 발달 속도를 가속화 시키고 있다. 또한 다양한 수치 모델들이 개발되면서 이들에 대한 계산 시간, 정확도, 적용범위 등의 성능을 평가하기 위한 benchmark 시험이 수행되었다[1]. Benchmark 시험은 일반적으로 거리 독립 문제와 거리 의존 문제로 나누어 수행되며, 거리 독립문제에 대해서는 대부분의 모델들이 그 결과가 잘 일치하고 있지만 거리 의존 문제에 대해서는 이론적인 접근 방식에 따라 그 결과가 다소 다르게 나타난다.

우리나라 근해는 해저면의 형상과 해류의 흐름이 매우 복잡하므로 이를 수치적으로 음파전달 경로 및 세기 예측하기 위해서는 반드시 거리 의존 모델을 사용하여야 한다. 수중에서 장거리 음파전달을 해석할 수 있는 거리 의존 모델로는 연성 정상 모드 모델(coupled normal mode model), 포물선 방정식 모델(parabolic equation model), 가우시안 빔 모델(Gaussian beam model), 스펙트럴 파수적분 모델(spectral wavenumber integration model) 등이 있다. 이러한 거리 의존 모델들을 우리나라 근해 해양환경에서의 음파전달 예측모델로 사용하기 위해서는 이들에 대한 정확한 이해가 필요하다. 이를 위해 우리나라 해양환경 특성에 적합한 거리 의존 benchmark 시험이 수행되어야 하며 본 논문에서는 그 시작단계로 기존의 benchmark 문제에 대해 각 모델의 성능을 평가하였다.

본 논문에서 benchmark 시험에서는 Seong의 analytic 모델[2], Porter의 KRAKEN[3](coupled mode model), Collins의 FEPE[4]와 RAM[5](parabolic equation model), Porter등의 BELLHOP[6](Gaussian beam model), Schmidt등의 spectral wave number integration 모델[7]등이 사용되었다. 이들은 모두 거리 의존 모델이며 거리 의존 해양환경에서 정확하고 유용한 해를 제공해주는 모델로 잘 알려져 있다.

1장에서는 benchmark 시험을 수행하는 세가지 해양환경을 제시하였고, 2장에서는 본 논문에서 사용되는 모델들에 대해서 개략적으로 설명하였다. 3장은 계산결과 및 고찰이며 끝으로 4장은 결론이다.

1장 Benchmark 문제

일반적인 거리 의존 해양환경은 거리에 따른 해저면의 형상변화와 음파속도변화를 함께 포함하고 있다. ASA(Acoustical Society of America) benchmark 문제[1]는 이 두가지 특징을 분리하여 따로 수치모델들에 대해 시험한다. 첫째는 해수와 해저층에서 각각의 음파속도와 밀도, 전달손실율이 일정하고 해저면의 깊이가 거리에 따라 점차 줄어드는 문제(경우 1,2)이고 둘째는 해수면과 해저면이 평행이고 음파전달 속도가 거리에 따라 변화하는 문제(경우 3)이다.

표 1 Benchmark wedge problem

Common parameters

- wedge angle $\theta_0=2.86^\circ$
- frequency $f = 25\text{Hz}$
- sound speed in water column
 $c_w = 1500 \text{ m/sec}$
- water density $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$
- source depth = 100m
- pressure-release surface
- point source

Case 1) Pressure-release bottom

Case 2) Penetrable lossy bottom

- sound speed in the bottom
 $c_B = 1700 \text{ m/sec}$
- density ratio $\rho_B/\rho_w = 1.5$
- bottom attenuation $\beta = 0.5 \text{ dB}/\lambda$

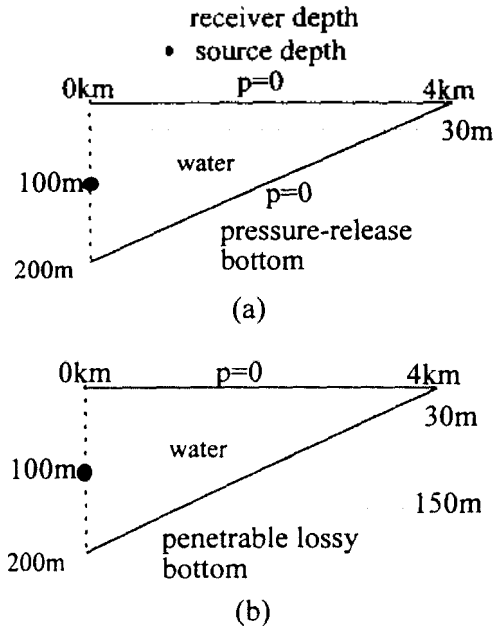


그림 1. Schematics of benchmark wedge problem involved in (a) pressure-release bottom and (b) penetrable lossy bottom

A. 쐩기형 도파관 문제

쐩기형 도파관 문제는 표 1에 요약되어 있고, 해저면의 형상을 그림 1에서 도식적으로 나타내었다. 해수층은 밀도가 1.0g/cm^3 이고 음전달속도가 1500m/sec 로 일정한 균일 매질이다. 해수면은 Dirichlet경계조건 (pressure-release surface)을 만족하고 해저면의 깊이가 200m에서 0m까지 수평거리방향 4km에 걸쳐 감소한다(해저면의 기울기는 2.86°). 25Hz의 점음원이 수평거리가 0m이고 깊이가 100m인 곳에 위치하며 수신기는 깊이 30m와 150m에 배열한다.

쐩기형 도파관 문제는 해저면에서의 경계조건이 해수면의 경계조건과 같이 Dirichlet 경계조건을 만족하는 이상 쐩기 도파관 문제(ideal wedge problem)와 해저층 내에 전달 손실이 $0.5\text{dB}/\lambda$ 이고 밀도가 1.5g/cm^3 , 음전달 속도가 1700m/sec 인 손실 통과 해저층을 갖는 쐩기형 도파관 문제(penetrable lossy bottom wedge problem)으로 나누어 benchmark 시험을 수행한다.

B. 거리의존 수평 도파관

거리의존 수평 도파관 시험의 자세한 환경인자는 표2에 요약되어있고, 거리에 따른 음전달 속도 변화를 그림 2에 나타내었다. 거리에 따른 음전달 속도는 식(1)을 따르고 해수면과 해저면의 경계조건은 각각 Dirichlet경계조건과 Neumann 경계조건이다. 25Hz의 점음원이 수평거리 0m, 깊이 250m인 곳에 위치하고 있으며, 수신기 역시 깊이 250m에 4km에 걸쳐 배열한다.

2장 수치모델

본 논문에서 사용하는 모델은 해석적인 해법과 연성 모드 모델인 KRAKEN, 포물선 방정식 모델인 FEPE와 RAM, 스펙트럴 과수적분법 모델인 CORE, 가우시안법 모델인 BELLHOP 등의 수치해법이다.

A. 해석적인 해

파방정식을 시간에 관하여 푸리에 변환하면 다음과 같은 Helmholtz방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla^2 p + k^2 p = -Q\delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \tag{2}$$

표 2. Benchmark range-dependent plane-parallel waveguide

Case 3) Plane-parallel waveguide

frequency $f = 25\text{Hz}$

sound speed in water column

$$\frac{c(r, z)}{c_0} = \left\{ 1 + \left(\frac{\pi l_1}{L} \right)^2 e^{-2\pi r/L} + \left(\frac{2\pi l_2}{L} \right)^2 e^{-4\pi r/L} - \frac{2\pi l_1}{L} \left[1 - \frac{2\pi l_2}{L} e^{-2\pi r/L} \right] \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right) e^{-\pi r/L} - \left(\frac{4\pi l_2}{L} \right) \cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right) e^{-2\pi r/L} \right\}^{-1/2} \quad (1)$$

where $c_0 = 1500\text{m/sec}$

$L = 500\text{ m}$

$l_1 = 0.032 L$

$l_2 = 0.016 L$

source depth = 250m

pressure-release surface and rigid bottom

point source

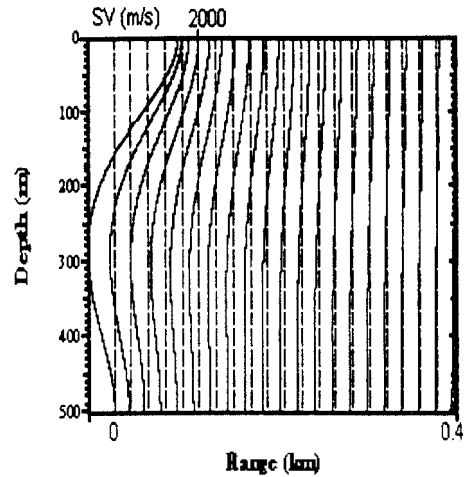


그림 2. Range and depth dependent sound velocity profiles in the plane-parallel waveguide of depth $z = 500\text{m}$. The dashed vertical line correspond to 1500m/s at the ranges

여기서 p 는 음압, k 는 파수, Q 는 음원의 세기, δ 는 Dirac delta 함수, \vec{r}, \vec{r}_0 는 각각 수신기와 음원의 위치를 나타낸다.

식(2)를 계기의 정점을 잇는 선을 중심으로 하는 원통좌표계에 대해서 다시쓰고 그 식을 세 개의 독립변수에 대해서 적분 변환(해수면과 해저면이 이루는 각 방향으로 유한 푸리에 sine 변환, 정점으로부터의 거리 방향으로 Hankel 변환, 원통좌표계의 축방향으로 Laplace 변환)을 적용시킨 후 이로부터 얻은 삼중 변환 식을 다시 앞의 변환에 대한 역변환을 각각 취하여 최종 해를 얻을 수 있으며[2], 그 결과는 모드의 합인 형태로 나타난다.

B. 연성 정상 모드 모델

정상 모드 모델은 전통적으로 거리 의존문제에 있어서 매우 정확한 해를 제공해 준다. 그러나 거리 의존 문제를 다룰 수 없는 것이 큰 단점이었다. 1980년 초에 이러한 단점을 극복하기 위해 거리 의존 모델로의 확장이 이루어 졌는데 이것이 바로 연성 정상 모드 모델(coupled normal mode model)[8]이다. 이 모델은 거리 의존 문제를 여러개의 거리 독립문제로 나누어 각각의 문제에 대한 정상 모드를 계산하여 그로부터 얻은 모드들을 연성(coupling)시켜 최종으로 거리의존 해를 구한다. 연성모드 모델은 전진파와 후방산란파를 모두 구할 수 있는 양방향 연성 모드 모델과 전진파만을 구할 수 있는 한 방향 연성 모드 모델이 있다. 양방향 연성 모드 모델은 매우 정확하대 비해 계산시간이 너무 오래 걸려서 다른 모델의 정확도를 알아보는 척도로만 쓰이고 실제에 있어서는 한 방향 노말 모드 모델을 사용한다. 이는 한 방향 노말 모드 모델이 후방 산란 파를 무시하고 거리방향으로 전진하면서 계산을 수행하기 때문에 양 방향 연성모드 모델에 비해 계산 시간 면에서 크게 유리하기 때문이다. 여기서 사용하는 연성 정상 모드 모델은 Porter의 KRAKEN[3]이다

C. 포물선 방정식 모델

포물선 방정식 모델은 거리 의존 해양환경하에서 전진파만을 고려하는 대표적인 수치 모델이다. 이 모델은 타원형 방정식인 Helmholtz 방정식(식(1))으로부터 전진파 항과 후진파 항을 분리한 후 전진파만을 취하여 포물선 형태의 편미분 방정식을 얻는다. 이 포물선 방정식을 푸는 수치 해법에 따라 여러 가지 포물선 방정식 모델이 있지만 여기서는 Collins의 FEPE(finite element parabolic equation)[4]와 RAM(range-dependent acoustic model)[5]을 사용한다. FEPE는 깊이방향으로는 Galerkin 방법을 사용하고 거리방향으로는 Crank-Nicolson 방법을 사용한다. RAM 역시 깊이방향으로는 Galerkin 방법을 사용하고 거리 방향으로는 split-step 법을 사용한다.

표 3. Benchmark problems and numerical models

Benchmark Problem	Numerical Model
case 1) ideal wedge problem	analytic solution
case 2) penetrable lossy bottom problem	KRAKEN, RAM, FEPE, CORE
case 3) plane-parallel waveguide	RAM, BELLHOP

D. 스펙트럴 파수식분 모델

파수식분법은 SAFARI(9)의 도입으로 거리 독립 수중음과 전달 해석 모델 중 계산시간이 매우 빠르고 정확도가 뛰어난 방법으로 평가 받고 있다. 그러나 거리 방향으로 푸리에 변환을 사용하는 방법이므로 거리의 큰 분해에의 적용이 용이하지 않다. 이를 극복하기 위해서 Schmidt(8)등이 경계 요소법과 거리 연성을 통한 super element 방법을 고안하였으며 그의 결과는 매우 정확한 결과를 주는 것으로 증명되었다. 여기서는 Schmidt의 CORE 코드(7)를 사용한다.

E. 가우시안 빔 모델

Gaussian beam 모델은 음선이 각 음선에 수직한 방향으로 음장의 Gaussian분포를 갖는 점에 착안하여, 각각의 음선을 가우시안 빔의 중앙음선으로 간주하고 빔장을 계산, 여러빔들의 중첩으로 전체의 음장을 구하여 방법이다. 이 방법은 특히 음선추적법의 결점인 음영대(shadow zone)와 caustic에서의 무한 에너지 준위 등을 피할 수 있으며, 파동이론에 의한 접근이 어려운 고주파수, 거리중속 환경에서 효과적이다. 여기서는 Porter의 BELLHOP(6)을 사용한다.

3장 계산결과 및 고찰

2장에서 소개한 각각의 benchmark에 대해 서로 다른 수치모델로 계산하여 그 결과를 비교한다. benchmark 각각에 해당하는 수치모델은 표 3에 나타내었다.

경우 1) Ideal wedge problem

전파되는 정상 모드의 개수 m 은 식 (3)에 의해 결정된다(11). 따라서 음원의 위치 근방에서 정상모드의 개수는 6개이다 음원이 도파관의 깊이 중앙에 위치해 있어서 짝수 모드를 발생시키지 못하므로 실제 정상 모드의 개수는 3개이다(1, 3, 5번 모드).

$$k \geq \frac{m\pi}{D} \quad (3)$$

식 (3)에 의하면 해저면의 깊이가 변화면서 전파되는 모드의 개수가 줄어드는 것을 알 수 있다. 거리방향 0km에서 1km 정도까지는 3개의 모드, 1km에서 2.2km까지는 2개의 모드의 상호간섭을 볼수 있을 것이다. 2.2km에서 3.4km 사이에서는 1개의 모드만이 전파되고 그 이후로는 음파가 전달되지 않는 영역이다 이렇게 거리에 따라 모드의 개수가 줄어드는 것은 음원으로부터 전진해 오던 모드가 수평굴절 현상(horizontal refraction)에 의해서 후진하기 때문이다. 그림 3은 analytic 모델의 계산결과이며 전진파와 수평굴절현상에 의한 후진파의 위상차에 의한 요동이 있음을 볼 수 있다 이러한 복잡한 결과 때문에 앞서 언급한 구간별 정상 모드의 개수에 의한 상호간섭이 뚜렷이 구분되지는 않지만 대체적으로 수평거리가 증가함에 따라 구간별 상호간섭의 정도가 약해지다가 3.4km 이후 구간으로는 음이 전달되지 않는 것을 볼 수 있다

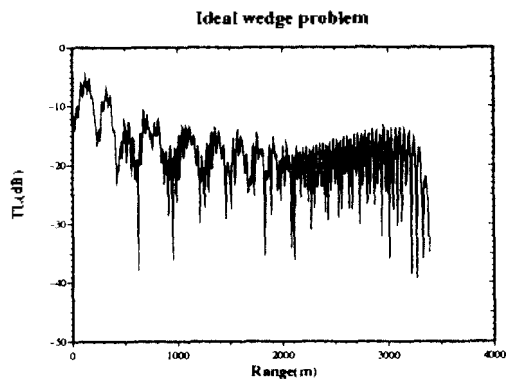


그림 3 Analytic solution for wedge problem with pressure-release surface and bottom.



그림 4 Contoured transmission loss for wedge with penetrable lossy bottom from RAM.

경우 2) penetrable lossy bottom problem

손실 통과 해저면 문제는 경우 1 보다는 실제 해양환경에 가까우므로 대부분의 거리의존 수치모델들은 이 문제를 benchmark 문제로 사용한다. 그림 4는 경우 2에 대한 RAM의 결과를 거리와 깊이에 대한 contour로 나타내었다 거리에 따라 모드 상호간섭이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 경우 1에서와 같은 수평 굴절현상에 의한 모드 개수의 감소보다는 해저면이 손실 통과 해저면이기 때문에 거리에 따라서 모드가 상쇄되는 것을 볼 수 있으며, 거리방향 3.4km 지점에서 최저차 모드가 손실 해저면으로 상쇄되는 것을 뚜렷이 볼 수 있다. FEPE와 RAM은 그 계산시간에 있어서 차이가 날 뿐 계산의 정도에는 차이가 없으므로 여기서는 RAM과 KRAKEN, spectral 모델을 비교하기로 한다.

그림 5는 경우 2에 대한 각각의 모델의 계산결과를 수신기의 깊이 30m와 150m에서 서로 비교한 것이다. RAM과 spectral 모델은 잘 일치하는 것을 볼 수 있지만 KRAKEN의 경우 거리가 커질수록 그 차이가 더 커지는 것을 알 수 있다. 이는 KRAKEN의 경우 거리방향으로의 에너지 보정을 하지않았기 때문이다[10].

경우 3) range-dependent plane-pararel waveguide

해수면과 해저면에서의 경계조건이 각각 Dirichlet과 Neumann조건으로 주어지고 음전달속도가 1500m/sec 라고 가정하여 도파관내에 전달되는 모드의 수를 계산하면 약 17개 정도이다. 그림6은 음과전달속도가 식(1)

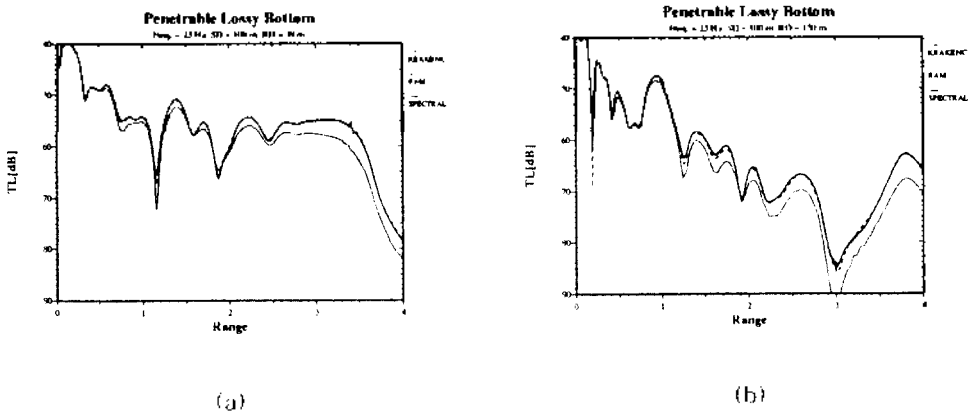


그림 5 Comparison of results from RAM, KRAKEN and CORE for wedge with penetrable lossy bottom. Receivers at (a)30m and (b)150m.