영상 모델에 의한 표준쐐기 매질내의 음장 계산

Computation of the Acoustic Field in Benchmark Wedge Medium by Image Model

백 칠 기*, 장 지 원**
(Chil-Ki Baek*, Jee-Won Chang**)

요 약

1986년 미국음향학회 수중음향학술분과 특별회기중에 제안된 표준쐐기형 매질내의 음장(Acoustic Field)을 계산하기 위하여 영상모델(Image Model)이 사용되었다. 음장의 계산 결과는 왕복결합모드모델(Two-Way Coupled Mode Model)과 음선모델(Ray Model)에 의한 계산 결과들과 비교되었다. 영상모델은 그 특성에 의한 제한점을 갖고 있으나, 표준 쐐기형 매질의 음장 계산에 사용될 수 있고, 기존의 수치모델(Numerical Model)과는 달리 개인용 콤퓨터로써 쐐기형 매질의 음장 계산이 가능하기 때문에 음파 전파 현상분석 등의 연구에 유용하게 사용될 수 있다.

ABSTRACT

An image method is used to calculate the acoustic field in benchmark wedge medium problems proposed at the Special Session for Underwater Acoustics of the Acoustical Society of America in 1986. The field results are compared with the results of the ray model and the two-way coupled-mode model. The image model can be used to compute the acoustic field in wedge shaped media by utilizing a personal computer for the analysis of wave propagation phenomena differently from the other existing numerical models, although it has a limitation due to the model's characteristics.

I. 서 론

음장계산의 수치모델분야는 콤퓨터의 발전과 함께 과거 20여년 동안 지속적으로 발전되어 왔다. 약 1970년도까지는 파동방정식의 근사적인 해는 전산계산이 효과적인 음선이론(ray theory)에 기초한 수치모델이 거의 유일한 기법으로 사용되었다. 1970년대 초기에 성능이 우수한 콤퓨터의 출현은 파동방정식의 해를 보다 정확히 구할 수 있는 수치모델 개발을 가능케 하였다[1]. 거리에 의존하는 음향학적 문제의 해에 관한 파동이론의 수치모델써는 정상모드(normal mode) 기법[2,3], 포물근사(parabolic approximation) 기법[4,5]과 유한요소(finite-element) 기법[6] 등이 있다.

영상모델은 경계면이 직선적이고 경계조건이 $\Psi=0$ (자유경계면), $\partial\Psi/\partial n=0$(강체경계면) 또는 $a\Psi+b\partial\Psi/\partial n=0$(자유경계면과 강체경계면의 선형결합 경계면)일때는 음장 계산의 좋은 기법으로 알려져 있다[7]. 영상은 거울에서 반사되어 볼 수 있는 경우와 같으면 실영상(real image)으로, 볼 수 없을 경우에는

*해군사관학교 물리학과
**부산수산대학교 물리학과
*수일자 : 1993년 8월 6일

Sommerfeld[8]가 처음으로 언급한 허영상(imaginary image)으로 분류되며 두 경우 모두 음장에 기여한다[9]. 영상방법을 사용한 천해음파전달 모델로써는 McLeroy[10], Macpherson과 Daintith[11] 등에 의한 것들이 있다. 영상모델은 음선을 시각적으로 볼 수 있다는 측면에서는 음선모델과 동일하게 분류될 수 있으나 파동방정식의 근사적인 해를 사용하는 음선모델과는 다르며, 주어진 경계면 조건을 만족하는 존재 가능한 파동방정식의 해를 기초로하는 정상모드 모델과는 다르게 경계면 조건에 의한 영상음원의 특성에 의존되는 독특한 기법이라 할 수 있다.

시간에 의존하는 단순한 해양환경 문제의 수치모델 결과라도 확인할 수 있는 해석적인 해법이 대부분 불가능하기 때문에 다양한 수치모델의 정확성을 상호 비교 확인할 수 있는 방안으로 1986년 112차 미국음향학회의 제1차 수중음향학술 특별분과회의에서 표준쐐기 문제를 제정하였다[12,13].

제정된 표준쐐기는 그림 1과 같다. 표준쐐기의 문제는 쐐기의 변수에 따라 3가지 경우로 구분된다. 3가지 경우의 공통사항은 쐐기각은 2.86°, 음원주파수는 25 Hz, 쐐기내 매질의 음속은 1,500 m/sec, 밀도는 1.0 g/cc, 음원의 수심은 100 m, 음원에서 쐐기의 수심은 200 m, 음원과 쐐기 정점간의 수평거리는 4 km, 쐐기의 표면은 자유면(free surface)이다. 경우 A는 쐐기의 바닥 경계면이 자유면, 음원은 쐐기 정점과 평행한 선음원(line source)이며, 수신기의 수심은 30m 일때이다. 경우 B는 침투 가능한 무손실 바닥(penetrable lossless bottom)의 경계면, 바닥 하부층 매질의 음속은 1,700 m/sec, 밀도는 1.5 g/cc, 음원은 점음원(point source)이며 수신기의 수심은 30 m 또는 150 m일때이다. 경우 C는 흡수 계수가 0.5 dB/λ인 침투 가능한 손실 바닥(penetrable lossy bottom)의 경계면을 갖는 것 외에는 경우 B와 같다. 수치모델 결과는 X축은 거리, Y축은 50 dB의 범위를 갖는 전달손실의 그래프로 표시되어야 한다.

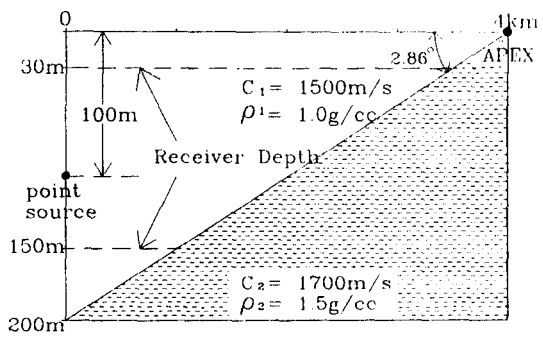

그림 1. 표준쐐기의 단면도

본 연구의 목적은 영상방법으로 3차원 쐐기형 매질내의 음장을 구할 수 있는 모델을 작성하여 표준쐐기에 적용하고 그 결과를 왕복 결합 모드모델(two-way coupled mode model) 및 음선모델(ray model)과 비교분석하여 영상모델의 특성을 제시하고자 하는 것이다.

II. 영상모델에 의한 음장 계산

영상방법에 의한 3차원 쐐기형 매질에 대한 음상계산모델은 C.Baek and J.Chang에 의해 1989년 작성되었다[14]. 이 모델에서 사용한 거리는 표준거리(normalized distance)이며, 음원의 주파수는 임의이고, 음원의 강도는 표준거리에 비례하는 점음원이었다. 쐐기내의 실음원 S와 그 영상음원 S_i들은 그림 2에 표시된 것처럼 쐐기 정점을 중심으로 하는 원주상에 위치한다. 영상음원의 개수는 쐐기각에 의해 결정된다. 360도 원주상에 표시되는 영상은 실영상(real image)으로 표시되지 않는 영상은 허영상(imaginary image)으로 분류되며, 허영상은 쐐기각의 정수배가 180°가 되지 않을 때 생긴다. 허영상 음원은 쐐기의 정점에서 발생되는 회절효과를 나타낸다[15]. 허영상에 의한 효과는 쐐기각이 작고 쐐기 정점에서 상당히 떨어져 있으면 무시할 수 있으므로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

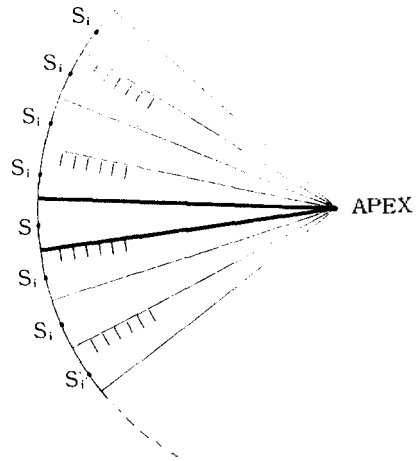

그림 2. 쐐기의 실음원(S)와 영상음원(S_i)의 위치

그림 3에서 R은 원점에서 수신기까지의 수평거리, Rs는 쐐기 정점과 음원간의 수평거리, Rr은 쐐기정점과 수신기간의 수평거리, Zs는 음원의 수심, Zr은 수신기의 수심, r_n은 n번째 음원(S 또는 S_i)과 수신기간의 거리, R_1은 정점과 음원간의 거리, R_2는 정점과 수신기간의 거리이다.

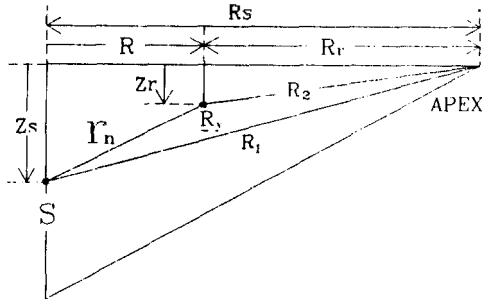

그림 3. 쐐기의 좌표계와 변수.

조화 점음원에 대한 음압 P는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(r_n) = \frac{A}{r_n} \exp(-jkr_n) \quad (1)$$

여기서 A는 상수이며, r_n은 n번째의 음원(S 또는 S_i)으로 부터 수신기까지의 거리이다. 선음원에 대한 음압 P는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(r_n) = \frac{B}{\sqrt{r_n}} \exp(-jkr_n) \quad (2)$$

여기서 B는 음원 특성에 의한 상수이며, r_n은 n번째 음원으로 부터 수신기까지의 거리이다.

표준 쐐기내의 주어진 점에서 총음압은 각음원(S와 S_i)에 의한 음압의 선형결합과 같다. 실 음원(S)에서 발생한 음선중에서 특별한 음선만이 수신기(Rv)에 도달한다. 이것을 고유음선(eigenray)이라고 부른다. 고유음선의 총수는 각음원(S 또는 S_i)의 총수와 같다. 각각의 고유음선은 서로 다른 경로와 경계면과의 입사각을 갖게된다. 선음원에 의한 쐐기내의 주어진 점(R, Zr)에서 총 음압 P(R, Zr)은 다음 식으로 나타낼 수 있다[14].

$$P(R, Zr) = \sum_n \left(\prod_i R(\phi_{ni}) \right) P(r_n) \quad (3)$$

여기서 n은 고유음선이며, $R(\phi_{ni})$은 고유음선이 경계면과 갖는 반사계수로써 Brekhovskikh[16]의 반사계수를 사용하였고, ϕ_{ni}는 고유음선과 경계면의 입사각(grazing 각도)이다. $R(\phi_{ni})$는 다음과 같다.

$$R(\phi_{ni}) = \frac{D \cdot \sin(\phi_{ni}) - M_2 + j\, M_1}{D \cdot \sin(\phi_{ni}) + M_2 - j\, M_1} \quad (4)$$

여기서

$$D = \rho_1/\rho_2$$

$$M_1 = \frac{\sqrt{\sqrt{A^2+B^2}+A}}{2}$$

$$M_2 = \frac{\sqrt{\sqrt{A^2+B^2}-A}}{2}$$

$$A = \cos^2(\phi_{ni}) - n^2$$

$$B = 2n^2\alpha/k_2$$

A와 B에서 $n = C_1/C_2$, k_2는 쐐기 바닥 매질의 파수이고, α는 바닥 하부층의 Np/m로 나타낸 흡수계수(Np/m)이다. ϕ_{ni}는 n번째 고유음선이 i 번째 쐐기 경계면과의 입사각이다.

전달손실 PL은 다음 식과 같이 정의될 수 있다.

$$PL = -20 \log \left(\frac{P(R, Zr)}{P(1)} \right) \quad (5)$$

여기서 P(1)은 음원에서 1m 떨어진 점의 음압이며, P(R, Zr)는 그림 3의 표준쐐기 좌표계의 (R, Zr)점에 대한 음압이다.

Ⅲ. 결과 분석 및 평가

1. 표준쐐기 경우 A:

경우 A는 표면과 바닥 경계면의 반사계수 $R(\phi_{ni})$가 −1.0인 완전반사 경계면을 갖는 이상적인 쐐기이다. 음원은 선음원이며, R이 3400m, Zr = 30m이면 바닥의 경계면과 일치하므로 쐐기안의 매질에 대한 R의 범위는 0-3400m이다. 식 (5)에 의한 전달손실 계산결과를 그래프로 나타내면 그림 4(a)와 같다. 이것은 Buckingham and Tolstoy[17]의 결과인 그림 4(b)와 Jensen and Ferla[1]의 왕복 결합 모드에 의한 그림 4(c)와 잘 일치한다. 그림 4(a), 4(b)와 4(c)에서 R이 0-1000m에서는 3개 모드, R이 1000m-2200m에서는 2개 모드에 의한 상호 간섭 효과(유장의 불규칙

성)를 볼 수 있고, R이 2200m 3400m에서는 최저모드(lowest mode) 1개에 의한 유장의 규칙성을 알 수 있다. 그림 4(c)는 왕복 집합 모드의 결과인데 이것은 음원에서 해기 성질으로 진행한 파동이 성층부근에서 되돌아나와 수신기에 도달하는 후방산란(back scattering)한 음파를 포함한 것이다. 여기서 우리는 영상모델은 후방산란 효과를 포함하고 있음을 알 수 있다. 영상 모델에서 후방산란의 파동에 해당되는 고유음선은 해기의 경계면과 고유음선이 이루는 입사각(grazing angle) ϕ_m가 90도 이상인 음선이다. 이 후방산란한 파동은 해기 성질으로 진행한 파동과 상호간섭 작용하여 파동의 전폭 변화가 많게 된다.

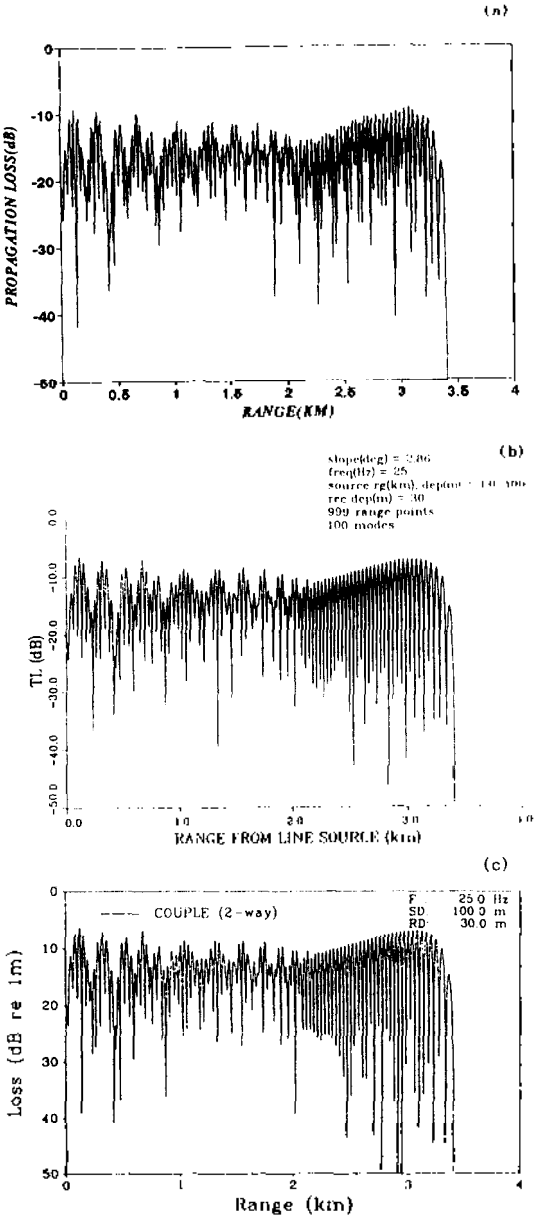

그림 4. 수평거리(R)의 함수로 나타낸 전남손실(PL)
(a) 영상모델의 결과,
(b) Buckingham and Tolstoy의 결과,
(c) Jensen and Ferla의 결과

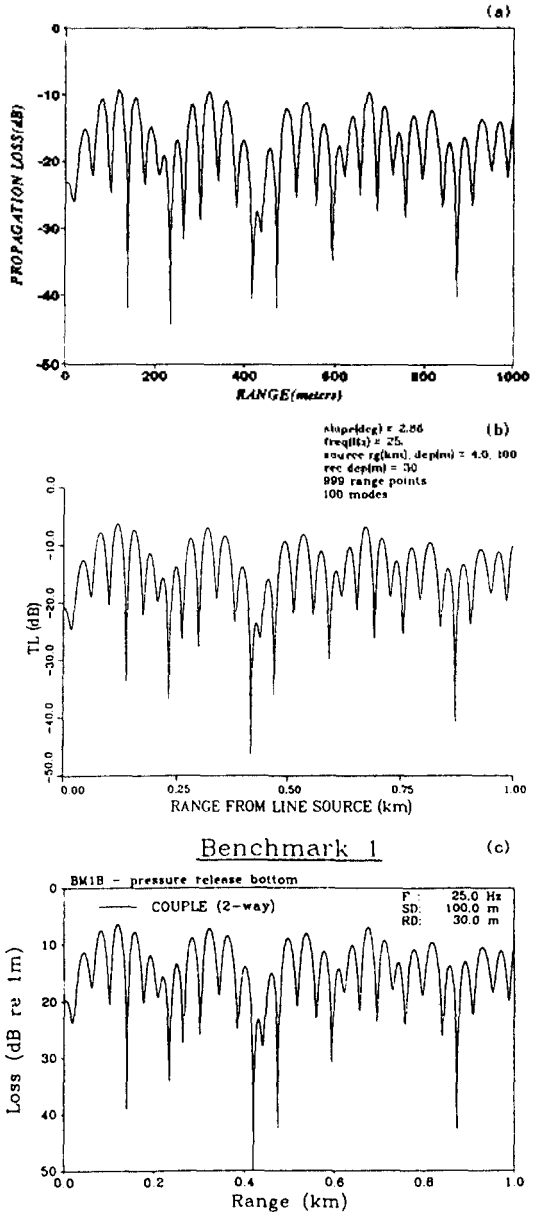

그림 5. 그림4의 0-1Km 구간을 확대한 그래프
(a) 영상모델의 결과(DATA 500개),
(b) Buckingham and Tolstoy의 결과(DATA 1000개),
(c) Jensen and Ferla의 결과

그림 4에서 R이 0-1 km의 부분을 확대하여 그린 것이 그림 5이다. 그림 5(a), 5(b)와 5(c)는 곡선의 전체적인 모양, 최고점과 최저점 등이 매우 잘 일치한다. 그러나 영상모델에 의한 결과인 그림 5(a)가 Buckingham and Tolstoy의 해석적인 해법에 의한 그림 5(b)와는 약 2dB, Jensen and Ferla의 왕복 결합 모드에 의한 그림 5(c)와는 약 3 dB 차이가 있는데 이것은 사용한 기준 음원수준(reference source level)의 값이 다르기 때문이라 생각된다.

Pekeris[18] 도파관(waveguide)의 바닥 경계면이 자유면(free surface)인 경우에 음장은 수심에 따른 함수로써 다음과 같이 나타낼 수 있다[19].

$$Pn(Z) = An \cdot \sin\left(\frac{Z_r n\pi}{Hr}\right) \cdot \sin\left(\frac{Z_s n\pi}{Hs}\right) \qquad (6)$$

여기서 n=1, 2, 3, ... (모드수) 이다. Hr과 Hs는 각각 수신기와 음원의 위치에서 쐐기의 수심을 나타낸다. 쐐기의 경우에 식(6)은 근사식에 해당되며 정확한 식은 쐐기 각으로 쉽게 기술된다[14]. 근사식을 표준쐐기 경우 A에 적용하면 Hs는 200m, Z_s는 100 m, 음원의 주파수는 25Hz이므로 원점에서 존재 가능한 총 6개 모드 중에 음원의 수심이 쐐기 수심의 중앙에 있는 대칭성으로 인하여 존재하는 모드는 n이 홀수인 n=1, 3, 5의 3개가 된다.

영상모델에 의한 표준쐐기 경우 A의 모드는 그림 6과 같다. 그림 6(a)에서 그림 6(f)는 표준쐐기 경우 A의 음원에서 존재 가능한 3개 모드의 변화를 수평거리 R의 함수로 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 n=5 모드가 존재 가능한 한계 수심인 150m, 그림 6(c)는

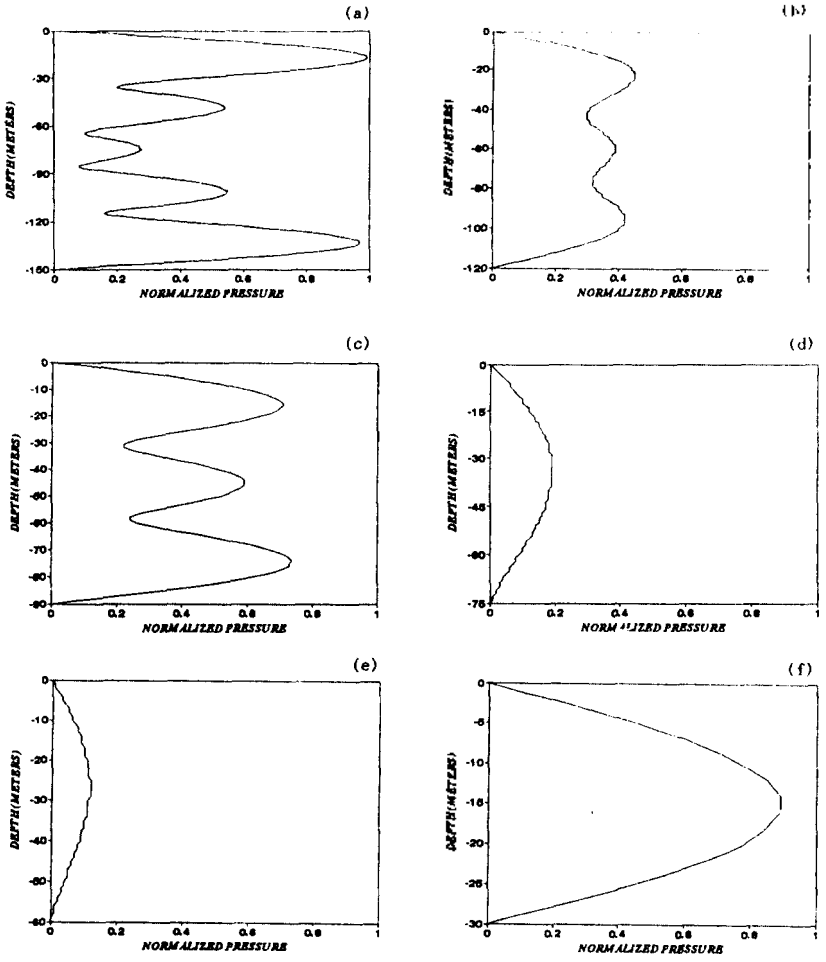

그림 6. 표준쐐기의 경우 A의 위치에 따른 모드 형태
(a) R = 1000m, (b) R = 1600m, (c) R = 2200m,
(d) R = 2500m, (e) R = 2800m, (f) R = 3400m

n=3 모드가 존재 가능한 한계 수심인 90m, 그림 6(f)는 n=1 모드가 존재 가능한 한계 수심인 30m에서 각 모드의 형태를 나타낸다. 그림 6(f)는 식 (6)과 일치하지만, 그림 6(a)와 그림 6(c)는 식 (6)과 일치하지 않는다. 이것은 식 (6)은 개별모드의 압력 진폭을 나타내는 반면 해기 수심 150m에서는 3개의 모드, 수심 90m에서는 2개의 모드가 함께 존재하기 때문이다. R이 1000m 보다 큰 영역인 그림 6(b)에서 그림 6(f)까지는 모드 5의 형태가 없고, R이 2200m 보다 큰 영역인 그림 6(d), (e), (f)에서는 모드 3의 형태가 없는 것은 Jensen and Ferla[1]의 결과와 일치한다.

영상모델로써 도출된 식 (5)를 IBM-PC(AT)로써 500개의 좌표 점에 대하여 계산하는데 소요되는 시간은 30초 정도이고, Buckingham and Tolstoy의 해석적인 방법에 의해 전달손실 1000개의 좌표점에 대한 계산에 소요된 시간은 2분 정도이다[17].

2. 표준해기 경우 B :

경우 B는 표면은 자유 경계면이고, 바닥은 흡수계수가 0인 침투 가능한 무손실 매질인 경우로써 좀더 실제적인 해양 환경과 유사하고, 음원은 점음원인 경우이다. 점음원에 대한 전달손실을 식 (5)에 의해 계산한 결과는 그림 7(실선곡선)과 같다. 그림 7은 표준해기 경우 A의 결과인 그림 4와 중요한 차이가 있다. 그 차이는 그림 4에서는 수평 거리 R에 따라 음장의 복잡한 변화가 있는 반면 그림 7에서는 없다. 이것은 침투 가능한 해기 바닥경계면을 갖는 경우에는 바닥이 자유 경계면인 경우와는 다르게 음선이 바닥 경계면과 부분반사(partial reflection) 할 때 파동에너지 일부가 바닥 하부층인 매질(해저 저질)속으로 들어간다. 이러한 부분반사를 계속하여 후방산란되는 음장의 크기는 음원으로부터 표면이나 바닥의 경계면과 반사하지 않고 수신기에 도달한 직접파(direct wave)의 크기에 비해 상당히 작다. Westwood[20]의 음선모델에 의하면 표준해기 경우 B에서 부분반사 1회시 음압의 진폭은 직접파에 비해 3-8 dB 정도의 진폭 감쇠가 있고, 추가 1회시 마다 10-11 dB의 진폭 감쇠가 있다. 후방산란된 음선은 15회 이상의 부분반사를 하므로 그 크기는 직접파에 비해 무시할 정도이다. 이것이 그림 7에서 복잡한 음장의 변화가 없는 이유이다.

그림 7에서 영상모델(실선곡선)과 Westwood[20]의 음선모델(점선곡선)에 의한 결과는 R이 400m 이하에서는 완전히 일치하다. R이 1.5km 부근에서 10 dB, R이 1.8km 부근에서 12-13dB, 그외 영역에서는 1-4dB의 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 고유음선이 침투 가능 바닥경계면에서 전반사할 때 발생되는 빔변위[21](beam displacement)와 측면파[22](lateral wave)의 효과를 영상모델에서는 고려하지 않기 때문이다. Jensen and Ferla[1]의 왕복 결합 모드모델에 의한 결과는 음선모델과 일치함을 알 수 있다. 또한 음원에서 가까운 음장은 직접파와 부분 반사파로 구성되고, 먼 곳의 음장은 직접파, 부분 반사파와 전 반사파로 구성됨을 알 수 있다.

영상모델로써 도출된 식 (5)를 IBM-PC(AT)로써 340개의 좌표 점에 대하여 계산하는데 소요되는 시간은 2분 정도이고, Westwood[20]의 음선모델을 사용하여 Cyber 180 830 콤퓨터로 400개의 좌표점에 대한 전달손실 계산에 사용된 소요시간은 8-10분 정도이고, Jensen and Ferla[1]의 왕복 결합 모드모델을 사용하여 FPS 164 배열계산기(array processor)로써 전달손실 계산에 소요된 시간은 8시간 정도이다.

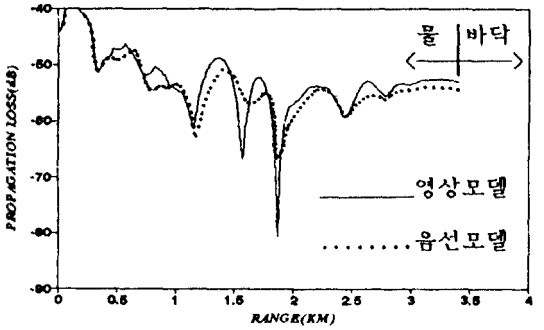

그림 7. 표준해기 경우 B(lossless bottom)의 전달손실(PL)

3. 표준해기 경우 C :

경우 C는 바닥의 흡수계수가 0.5 dB/λ인 침투 가능한 손실 매질인 경우로써 좀더 실제적인 해양 환경과 유사한 점만이 경우 B와 상이하다. 그림 8에서 영상모델과 Westwood의 음선모델에 의한 결과를 보면 R이 400m 이하에서 완전히 일치하다, R이 1.5km 부근에서 5dB, R이 1.8km 부근에서 5-6dB, 그외 영역에서는 1-4dB의 차이가 있음을 알 수 있다. 경우 C에서도 빔 변위(beam displacement)와 측면파[22](lateral wave)의 효과가 전달손실 두 곡선의 차이의 원인이나, 경우 B보다 그 차이가 적은 것은 경우 C에서는 흡수계수가 0.5 dB/λ인 손실 바닥이 있는 때문이다. 여기서 우리는 흡수계수가 크면 영상모델에 의한

결과가 음선모델에 의한 결과와 같아 짐을 알 수 있다. 왜냐하면 측면파는 물-바닥의 경계면에서 바닥의 흡수계수를 갖고 진행하며 진행거리가 클수록 음장에 미치는 효과가 적어지기 때문이다. Jensen and Ferla의 왕복 결합 모드모델에 의한 결과는 음선모델과 일치함을 알 수 있다[1]. 또한 경우 B에서와 같이 음원에서 가까운 음장은 직접파와 부분반사파로 구성되고, 먼 곳의 음장은 직접파, 부분반사파와 전반사파로 구성됨을 알 수 있다.

영상모델로써 도출된 식 (5)를 IBM-PC(AT)로써 340개의 좌표 점에 대하여 계산하는데 소요되는 시간은 2분 30초 정도이고, Westwood[20]의 음선모델을 사용하여 Cyber 180-830 콤퓨터로 400개의 좌표점에 대한 전달손실 계산에 사용된 소요시간은 8-10분 정도이며, Jensen and Ferla[1]의 왕복 결합 모드모델을 사용하여 FPS 164 배열계산기(array processor)로써 전달손실 계산에 소요된 시간은 8시간 정도이다.

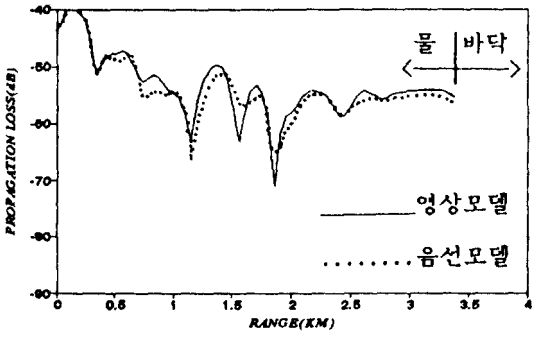

그림 8. 표준쐐기 경우 C(lossy bottom)의 전달손실(PL)

Ⅳ. 결 론

영상모델은 유향학적으로 거리에 의존하는 문제의 한 형태인 표준쐐기-경우 A(이상적인 쐐기)에 대하여는 음장(acoustic field)을 정확히 구할 수 있는 기준모델이 될 수 있고, 표준쐐기 경우 B와 경우 C에서는 전 반사시 빔 변위와 측면파의 추가 고려가 요구되나 바닥의 흡수계수가 큰 경우에는 음선모델, 왕복결합 모드모델 등의 결과와 같아 짐을 알 수 있었다.

음장 계산의 모델로써 영상모델의 특징은 (1)여러 다른 수치모델과는 달리 경계면의 조건에 제한을 받지만, (2)수치모델의 정확성을 판단할 수 있는 표준쐐기 경우 A의 음장 계산 문제 해결의 기준 모델로써 사용될 수 있으며, (3)후방산란되는 파동을 본질적으로 포함하고 있고, (4)음장계산에 소요되는 시간이 가장 적으며, (5)개인용 전산기(Personal Computer)로써 문제 해결이 가능하다.

참 고 문 헌

1. Finn B.Jensen and Carlo M. Ferla, "Numerical solutions of range-dependent benchmark problems in ocean acoustics," J.Acoust.Soc.Am.87, April, 1990.
2. D.C.Stickler, "Normal mode program with both the discrete and branch line contributions," J.Acoust. Soc.Am.57, May, 1975.
3. 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, April, 1983.
4. F.D.Tappert, "The parabolic approximation method," in Wave Propagation and Underwater Acoustics, edited by J.B.Keller and J.S.Papadakis, Springer, New York, pp.224-281, 1977.
5. F.B.Jensen and Kuperman, "Sound propagation in a wedge-shaped ocean with a penetrable bottom," J. Acoust.Soc.Am.67, May, 1980.
6. G.J.Fix and S.P.Marine, "Variational Method for Underwater Acoustics Problems," ICASE Report 77-16, 1977.
7. J.B.Keller, "Scope of the Image Method," Comm. Pure, Appl. Math., 6, 505-512, 1953.
8. A.Sommerfeld, "Mathematische Theorie der Diffraction," Math. Ann.47, 317-341, 1896.
9. D.Bradley and A.A.Hudimac, "The Propagation of Sound in a Wedge Shaped Shallow Water Duct," NOLTR, 70-235, 1970.
10. E.G.McLeroy, "Complex Image Theory of Low-Frequency Sound Propagation in Shallow Water," J. Acoust.Soc.Am.33, August, 1961.
11. J.D.Macpherson and M.J.Daintith, "Practical Model of Shallow-Water Acoustic Propagation," J. Acoust.Soc.Am.41, April, 1967.
12. Session R, "Underwater acoustics II : quality assessment of numerical codes, part 2 : benchmarks," J. Acoust.Soc.Am. 80, S36-S38, 1986.
13. "Numerical solutions of two benchmark problems," J.Acoust.Soc.Am.Suppl.81, S39-S40, 1987.
14. C.Baek and J.Chang, "The Acoustic Pressure in a Wedge-Shaped Medium with Absorbing Material

Boundaries," J. Acoust. Soc. Korea, Vol.8, No.6, 1989.
15. G.B. Deane and Ç.T.Tindle, "A three-dimensional analysis of acoustic propagation in a penetrable wedge slice," J. Acoust. Soc. Am. 92, September, 1992.
16. L.M.Brekhovskikh, "Waves in Layered Media," 2nd ed., Academic Press Inc., New York, p.10, 1980.
17. M.J.Buckingham and A.Tolstoy, "An analytical solution for benchmark problem1 : The "ideal" Wedge," J. Acoust. Soc. Am. 87, April, 1990.
18. C.L.Pekeris, "Theory of propagation of explosive sound in shallow water," Geol. Soc. Am. Mem. No. 27, P.43, 1948.
19. L.E.Kinsler and others, "Fundamentals of Acoustics," 3rd ed., Wiley, New York, p.433, 1981.
20. E.K.Westwood, "Ray model solutions to the benchmark wedge problems," J.Acoust. Soc. Am. 87, April, 1990.
21. C.T.Tindle, "Ray calculations with beam displacement," J.Acoust.Soc.Am.73, May, 1983.
22. E.K.Westwood, "Ray methods for flat and sloping shallow-water waveguides," J. Acoust. Soc. Am. 85, May, 1989.

▲장 지 원

1950년 6월~1954년 3월 : 부산수산대학 어업학과 (수산학사)
1955년 4월~1957년 3월 : 부산수산대학 수산물리학과 (수산석사)
1960년 1월~1961년 2월 : 뉴욕주립대학 물리학과 (수학)
1974년 2월~1977년 2월 : 부산 수산대학 수산물리학과 (이학박사)
1965년 4월~현재 : 부산 수산대학 물리학과 교수
1969년 9월~현재 : 한국 어업 기술학회 회원 (회장)
1977년 8월~1979년 8월 : 부산수산대학 대학원 대학원장
1981년 3월~현재 : 물리학회 회원(부산 경남지부장 역임)
1981년 8월~1989년 12월 : 한국 음향학회 부회장

▲백 칠 기

1968년 3월~1972년 3월 : 해군사관 학교(이학사)
1973년 3월~1975년 2월 : 서울 문리대 물리학과(이학사)
1981년 9월~1983년 12월 : 미 해군 대학원 (이학석사)
1989년 3월~1992년 2월 : 부산 수산 대학교 대학원 박사과정 수료
1994년 2월 : 학위 취득 예정
1972년 7월~1973년 3월 : PCEC 53함 음탐관
1975년 3월~1981년 7월 : 해군사관학교 물리 교관
1990년 2월~1990년 6월 : 해군사관학교 교수부 이학처장
1990년 6월~1992년 7월 : 해군작전 사령부 잠수함전대 교육대장
1992년 8월~1992년 12월 : 해군본부 작전참모부 수중처장 대리
1993년 1월~현재 : 해군사관학교 물리학 부교수