

# 천해에서의 음파전달에 관한 모형실험

- I. Discrete modes 만으로 이루어진 음장 -

## Model Experiments on Sound Propagation in Shallow Water

- I. Discrete modes only -

김 성 부\*, 김 상 한\*\*

(Sung Boo Kim\*, Sang Han Kim\*\*)

### 요 약

40~100m 수심에 평탄한 모래층으로 구성된 천해를 1/1,000 모형으로 축소시킨 무향 수조를 제작하여 Pekeris 모델에 의한 normal mode 관측 실험을 수행하였다. Continuous mode의 공진이 임계각 가까이에서 일어나지 않도록 수심과 진동수를 조절하였으며, 이 때의 실험자료들은 음원으로부터 거리가 대략 수심의 10배 이상일 때 discrete modes의 합으로만 구성된 이론식과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

### ABSTRACT

The pressure field for the Pekeris model which is consisted of a surface layer of fresh water overlying a thick (essentially semi-infinite) bottom layer of coarse sand is investigated experimentally in a anechoic tank scaled down 1/1,000. The water depth and frequency have been controlled so that the continuous mode integrand has not a resonance close to cut-off, and the experimental results relatively well agree with the theory which is represented as the sum of the discrete modes over a range about 10 times the water depth.

### I. 서 론

천해를 단순한 두 개의 등속 유체층으로 구성되었다고 가정하는 Pekeris 모델[1]은 그 단순성에 비해 천해에서의 음파전달 현상을 비교적 잘 설명해주고 있다. 조화 점 음원으로부터 발생하는 음장의 깊이별, 거리별 분포는 discrete modes와 continuous modes의 합으로 구성된다.[2, 3] 해저 입사각 임계각보다 작은 입사각 내에서 나타나는 continuous modes는 짧은 거리(보통 수심의 십수배까지)나 discrete modes의 모드 갯수가 몇개 뿐일 때 음장 분포에 중요하게 기여하며, 특히 continuous mode의 공진(이 때를 virtual mode라 부름[4])이 임계각 가까이에서 일어나면 그 영향은 더욱 증대된다.[5, 6]

그러나, 일반적으로 continuous mode의 공진이 임계각으로부터 떨어져 일어나면 수심에 비해 비교적 먼 거리에서의 음장은 discrete modes의 합으로만 표시해도 무방하다. 이러한 음장분포에 관한 실험적 관측은 해양을 상대로는 이미 몇몇 결과들이 발표되었다.[6] 그러나

실험실 내에서의 모델 실험은 이론과 거의 유사한 경계치 조건들을 구비할 수 있다는 장점에도 불구하고 장거리음장에 대한 주된 관심과 몇 가지 어려움 때문에 I. Tolstoy[7], W. C. Knudsen[8], A. B. Wood[9] 등에 의해 부분적으로 발표되었을 뿐 virtual modes의 영향에 대한 평가는 아직 없었다.

본 논문에서는 우선 Pekeris 모델의 모형 실험을 위해 1/1,000로 축소된 무향 수조를 제작하여 수심과 주파수를 virtual modes의 영향이 덜 받도록 설정한 후, discrete modes의 합으로만 된 이론식과 실험결과치를 비교분석하려 한다.

### II. Pekeris 모델에 대한 이론식

Pekeris 모델은 그림 1에서와 같이 수심  $h$ 에서 일정한 밀도( $\rho_1$ )와 등속층( $c_1$ )을, 그리고 그 아래로는 또다른 일정한 밀도( $\rho_2$ )와 등속층( $c_2$ )인 해저층으로 구성되어 있다.  $(0, z_0)$ 에 위치한 점음원은 각진동수  $\omega$ , 그리고 시간에 대하여  $e^{-i\omega t}$ 로 표시되는 음파를 발생시키고 있다. 이 때  $(r, z)$ 에 위치한 수신기에서의 음장은  $P(r, z, z_0)$ 로 표시되며, 다음과 같은 미분방정식과 경계치 조건들을 만족시킨다.

\*부산수산대학교 물리학과

\*\*경성대학교 물리학과

접수일자: 1996년 4월 1일

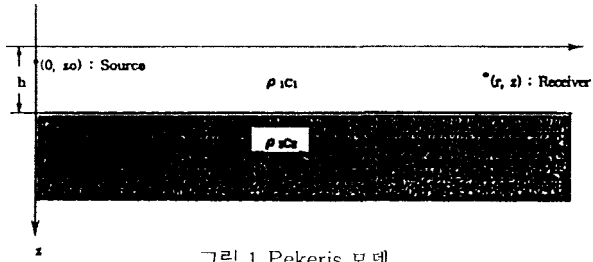


그림 1. Pekeris 모델

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + k_j^2 P = -\frac{\delta(r)}{2\pi r} \delta(z-z_0), z > 0 \quad (1)$$

$$P(r, 0, z_0) = 0 \quad (2)$$

$$P(r, h-, z_0) = P(r, h+, z_0), \quad r > 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial}{\partial z} P(r, h-, z_0) = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial}{\partial z} P(r, h+, z_0), \quad r > 0 \quad (4)$$

여기서  $k_j = \frac{\omega}{c_j}$  로  $j=1, 2$  이다.

음장은 (2), (3), (4)식의 경계치 조건들과 Hankel 변환에 의해 다음 식으로 표시된다.

$$P(r, z, z_0) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \gamma_1 z < [\sigma \gamma_1 \cos \gamma_1 (h-z_>) - i \gamma_2 \sin \gamma_1 (h-z_>)] H_0^{(1)}(Kr)}{\gamma_1 [\sigma \gamma_1 \cos \gamma_1 h - i \gamma_2 \sin \gamma_1 h]} K dK, \quad 0 < z < h \quad (5)$$

여기서  $\gamma_j = (k_j^2 - K^2)^{1/2}$ ,  $j=1, 2$ 의 관계를 가지며,  $\gamma_1, \gamma_2$ 는 각각 물과 해저층에서 파수의 수직성분이다. 그리고  $K$ 는 파수의 수평성분을 표시한다.

그리고,  $\sigma = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ ,  $z < = \min. (z_0, z)$ ,  $z > = \max. (z_0, z)$

이고  $H_0^{(1)}(Kr)$ 은 1종 0차 Hankel함수다. 복소수 평면에서 (5)식은  $\gamma_2 = 0$ 일 때, 즉  $K = k_2$ 에서 branch point를 가지며,

$$\cot \gamma_1 h = i \frac{\gamma_2}{\sigma \gamma_1} \quad (6)$$

(6)식을 만족할 때 simple pole을 갖는다.

각 층에서  $\text{Im}(\gamma_j) > 0$ 이어야 하는 조건에 따라 EJP (Ewing, Jardetsky, Press) branch cuts [10]를 택해 폐곡선을 따라 적분하면 discrete modes의 합에다 continuous modes의 기여분이 더해진 형태로 나타낼 수 있다. [3, 11, 12]

$$P(r, z, z_0) = P_d(r, z, z_0) + P_c(r, z, z_0) \quad (7)$$

앞에서도 언급한 바와 같이 임계각으로부터 먼 각도에

서 virtual modes가 생긴다면 가까운 거리외에는  $P_c(r, z, z_0)$ 의 기여도를 무시할 수 있기 때문에 음장을 다음식으로 표시할 수 있다.

$$P(r, z, z_0) \approx P_d(r, z, z_0) \quad (8)$$

(5)식으로부터 나타나는 discrete modes의 음장값은 (6)식을 만족할 때 (5)식의 피적분함수가 simple pole을 가지므로 residue만 구하면 아래 식과 같은 합으로 표시된다.

$$P(r, z, z_0) = \frac{i}{4} \sum_n \frac{\sin \gamma_{1n} z_0 \sin \gamma_{1n} z H_0^{(1)}(K_n r)}{\left[ \frac{h}{2} - \frac{\sin 2\gamma_{1n} h}{4\gamma_{1n}} + \frac{\sin^2 \gamma_{1n} h}{2\sigma \gamma_{2n}} \right]} \quad (9)$$

### III. 모형실험장치

수심이 40~100m이고, 해저면이 평탄한 천해에서 50~150Hz의 저주파로 수평거리 3km까지 음장을 측정할 수 있는 해양환경을 실내에서 구현하기 위하여 1/1,000로 축소된 모형수조를 만들었다. 지름이 0.6m이고 길이가 5m인 통에 거친 모래(밀도: 2,030kg/m<sup>3</sup>, 음속 1,826m/sec)를 평균 0.2m 두께로 아주 평탄하게 깔고, 수심이 0.04~0.1m 되도록 했다.

그리고 네 벽면에는 50kHz에서 20dB이상의 반향음 감쇠율 [13]을 갖는 wedge형의 흡음재질을 부착시켜 해양과 동일하게 수면과 해저면에서만 경계치 조건을 갖도록 했다. 음원과 수신용 수중 청음기는 기존 B&K의 8103 transducer에 acoustic center를 중심으로 상하 ±1mm의 틈만 남겨 놓은채 pressure-release 물질로 덮여 씌운 것을 점음원과 점수신 청음기로 사용하였으며 [7, 9] 거리별 관측은 컴퓨터 제어에 의해 5mm씩 이동후 신호음을 수신하여 A-D converter를 거쳐 신호처리 하였다.

### IV. 거리에 따른 음의 세기 변화

우선 수심을 51.6mm, 음원의 깊이를 19mm로 고정시킨 채 125kHz에 대한 각 깊이별 음의 세기를 관측하였다. 물의 밀도는 1,002kg/m<sup>3</sup>, 수온은 13°C로 깊이에 따라 일정하게 유지되게 하였으며, 이 때의 음속은 1,458m/sec이다.

이것은 수심이 51.6m이고 평탄한 모래 해저면을 가진 해양에서 125Hz의 음파로 normal mode 실험을 한 해양 환경과 동일한 조건이다.

수신기의 깊이를 17.5mm, 21mm, 27mm, 31.7mm로 가변시키면서 각각 2.7m까지 관측한 결과를 그림 2에 나타내었다.

실험결과들은 음의세기가 대체로 1/r로 감소하나 각 모드들의 간섭현상이 뚜렷이 나타나며, discrete modes의 합으로만 된 이론식과 거의 일치함을 알 수 있다. 임계각 52.98°를 넘어서 생기는 discrete modes의 갯수는 5

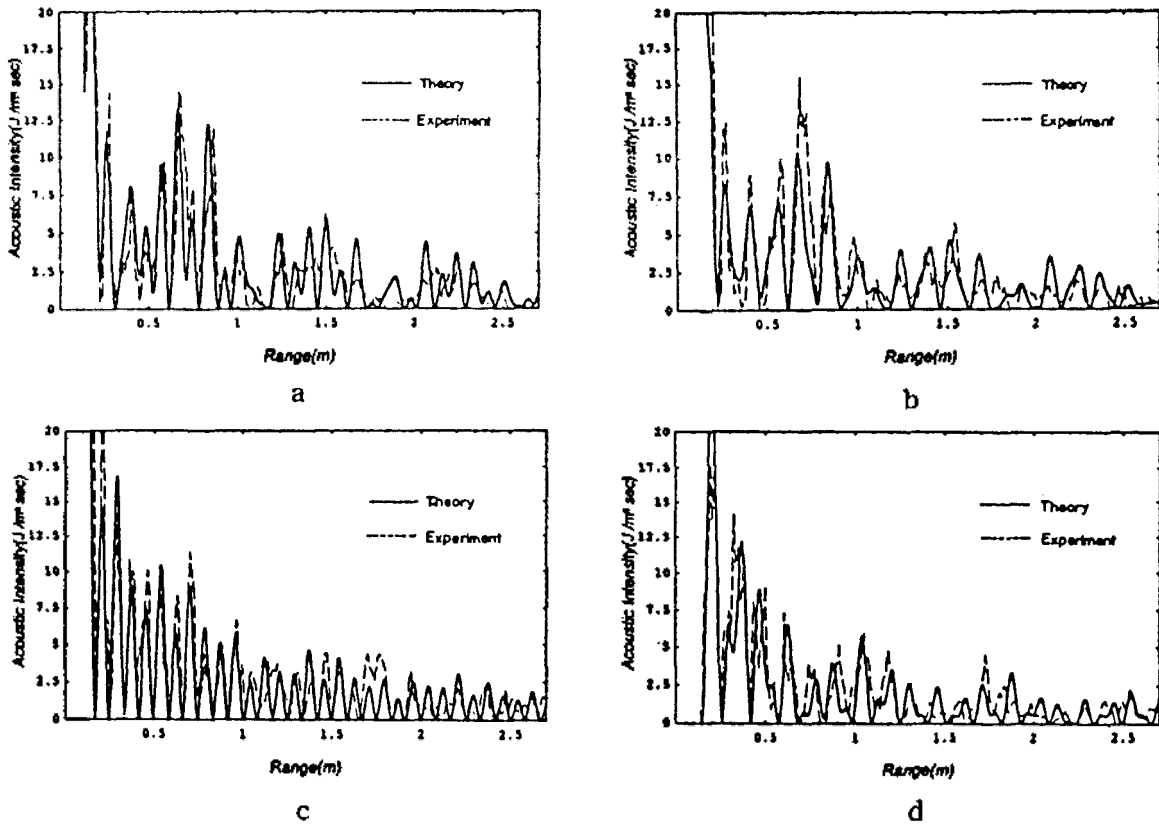


그림 2.  $h = 51.6\text{mm}$ ,  $f = 125\text{kHz}$ 에서 깊이별, 거리별 음의 세기 변화  
 a)  $z = 17.5\text{mm}$ , b)  $z = 21\text{mm}$ , c)  $z = 27\text{mm}$ , d)  $z = 31.7\text{mm}$

개이고, 임계각 이내에서 일어나는 virtual modes의 개수는 4개이다. 본래 virtual modes의 에너지는 많은 부분이 해저로 들어가기 때문에 임계각 가까에서 일어나지 않으면 물속에서의 에너지는 대부분이 discrete modes의 것이다.

여기서는 첫번째 virtual mode가 임계각으로부터 다소 떨어져 일어날 뿐만 아니라 음원의 깊이가 이 mode의 수직음장이 0이 되는 지점부근에 놓여 있으므로 물층내에서의 음파에너지는 discrete modes의 합으로 표시된다. 실제로 그림 2에 나타난 결과들은  $z = 21\text{mm}$ 와  $z =$

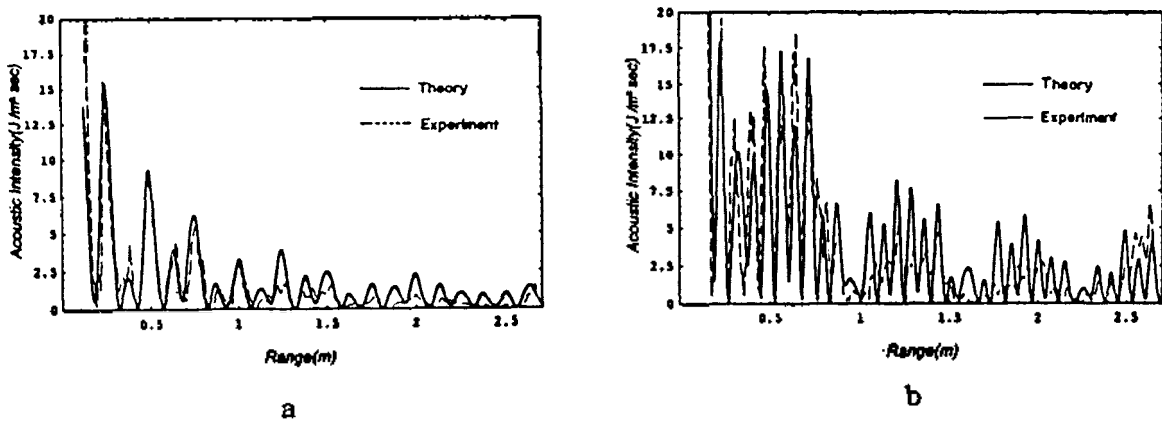


그림 3.  $f = 125\text{kHz}$ 에서 수심 변화에 따른 깊이별, 거리별 음의 세기 변화  
 a)  $h = 49\text{mm}$ ,  $z_0 = 21\text{mm}$ ,  $z = 24\text{mm}$ ,  
 b)  $h = 47.8\text{mm}$ ,  $z_0 = 15\text{mm}$ ,  $z = 17\text{mm}$

31.7mm인 경우, 수평거리 0.8mm 이내에서 다소 virtual modes의 영향을 받고 있을 뿐 그 나머지 길이에서는 거의 영향을 받지 않고 있다. virtual modes의 영향에 대한 결과는 다음논문에서 자세히 밝히겠다.

다음으로 주파수를 125kHz로 둔채 수신음 각각 49mm, 47.8mm로 줄며 음원과 수신기의 깊이를 변화시킨 결과를 그림 3에 나타내었다.

discrete modes의 갯수는 5개이나 virtual modes의 갯수는 3개로 줄어들고, 첫번째 virtual modes의 입사각이 임계각으로부터 더욱 벌어져 0.4mm 이내에서만 다소 그 영향이 나타나고 있다.

새빈체로 수온이 12.3℃로 물의 음속이 1,455m/sec일 때  $f = 80\text{kHz}$ ,  $h = 46.6\text{mm}$ ,  $z_0 = 27.5\text{mm}$ ,  $z = 21\text{mm}$ 로 두어 관측하였다. discrete modes와 virtual modes의 갯수는 각각 3개와 2개이며, 여기서도 virtual modes의 입사각이 임계각으로부터 벌리 떨어져 있어 물 속에서의 에너지는 discrete modes의 것으로 거의 한정된다. 그림 4에 나타난 이론치와 실험치는 공허 간섭과장이 147.6mm로 일정하게 나타나는데 이는 discrete modes중 1번 모드와 3번 모드에 의해서만 간섭현상이 나타남을 보여주고 있다. 2번 모드가 생겨나지 않는 이유는 (9)식을 통해서 알 수 있는 바와 같이 음원의 깊이가 2번 모드의 수직음장값이 0 되는 지점부근에 놓여 있기 때문이다.

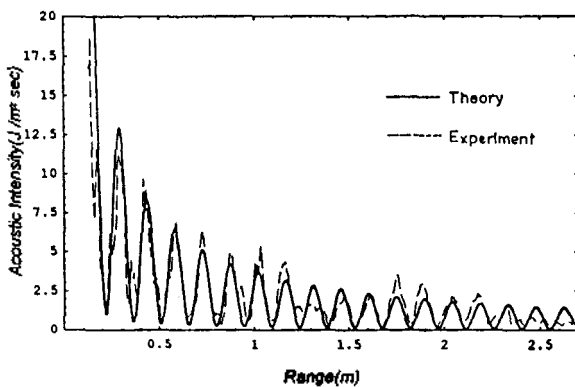


그림 4.  $h = 46.6\text{mm}$ ,  $f = 80\text{kHz}$ ,  $z_0 = 27.5\text{mm}$ ,  $z = 21\text{mm}$ 에서의 거리에 따른 음의 세기변화

V. 결론 및 토의

80kHz와 125kHz에서 관측된 모형수조내에서의 normal mode 실험은 실험결과와 이론치가 비교적 잘 일치하고 있다. 이러한 결과는, virtual modes가 임계각 가까이에서 생겨나지 않는 한 대략 수심의 십 수배 정도의 근거리만 이 모드의 영향을 받는다는 종래의 결과들과도 잘 일치한다.[5, 6] 중간지점 부근에서 일부 간섭 무늬가 다소 차이가 나는 것은 수심의 편차 외에도 수중청음기를 지지하면서 이동시켜주는 지지대가 이 지점 부근에서

아래로 약간 처져 있어 수신기의 깊이에 조그만 변화가 생겼기 때문이다.

참 고 문 헌

1. C. L. Pekeris, "Theory of propagation of explosive sound in shallow water," Geol.Soc. Am., Mem. 27(1948).
2. C. T. Tindle, A. P. Stamp and K. M. Guthrie, "Virtual modes and the surface boundary condition in underwater acoustics," J.Sound, Vib., 49, 1976.
3. D. C. Stickler, E. Ammicht, "Uniform asymptotic evaluation of the continuous spectrum contribution for the Pekeris model," J.Acoust.Soc.Am. 67(6), June 1980.
4. F. M. Labianca, "Normal modes, virtual modes and alternative representations in the theory of surface-duct sound propagation," J.Acoust.Soc.Am., 53(4), 1973.
5. C. T. Tindle, "Virtual modes and mode amplitudes near cutoff," J.Acoust.Soc.Am., 65(6), June 1979.
6. D. C. Stickler, "Normal-mode propagation with both the discrete and branch line contributions," J.Acoust.Soc. Am., 57(4), April 1975.
7. I. Tolstoy, C. S. Clay, *Ocean Acoustics*, McGraw-Hill, pp. 117
8. W. C. Knudsen, "Propagation of a pressure transient in a two-layer, liquid model," J.Acoust.Soc.Am., 29(8), Aug. 1957.
9. A. B. Wood, "Model experiments on sound propagation in shallow seas," J.Acoust.Soc.Am., Sept. 1959.
10. W. M. Ewing, W. S. Jardetsky, and F. Press, *Elastic Waves in Layered Media*, McGraw-Hill, New York, 1957.
11. J. B. Keller, J. S. Papadakis, *Waves Propagation and Underwater Acoustics (Lecture Notes in Physics, 70)*, Springer-verlag, Berlin, 1977.
12. J. A. DeSanto, *Ocean Acoustics (Topics in Current Physics, 8)*, Spinger-verlag, Berlin, 1979.
13. R. J. Bobber, *Under Electroacoustic Measurements*, Naval Res. Lab. Washington, D.C., 1970.

▲김 성 부(Sung Boo Kim) : 제14권 제4호 참조

▲김 상 한(Sang Han Kim) 1933년 2월 15일생  
 1957년 2월 : 경북대학교 물리학과(B. S.)  
 1959년 2월 : 경북대학교 대학원 물리학과(M.S.)  
 1979년 2월 : 부산수산대학교 대학원 (Ph.D)  
 1969년~1980년 : 부산수산대학교 교수  
 1981년~현재 : 경성대학교 물리학과 교수

