경사해저의 해안선 방향 음파 전달 특성에 관한 모형 실험

Model Experiments for Acoustic Propagation Characteristics in the Across Slope Direction of the Sloping Sea Bed

윤 종 락*

(Jong Rak Yoon)

요 약

경사해저에서의 음파전달은 해안선에 평행한 방향으로 음파의 궤적이 휘어짐을 보인다. 이 현상에 대한 이론적 해석은 해안선 방향으로 음장구역과 음영구역이 형성됨을 보이고 그 범위는 음원 및 수신기의 위치좌표, 경사각, 주파수에 좌우됨을 보인다. 본 연구에서는 실제 해양의 이 현상에 대한 연구의 일환으로 모형 해저를 이용한 실험으로 기존의 이론해석을 검증하고자 한다. 실험에 사용된 경사해저의 모형은 이상적인 pressure release 경계조건이었고 경사각은 22.5°이다. 무지향성 음원으로는 단일 주파수 신호와 광대역 충격신호 두 종류를 사용하였다. 전자는 해안선에 수직된 방향의 공간적 특성해석, 후자는 특정위치에서 음장의 주파수특성 해석에 사용되었다. 실험결과는 이론적인 해안선 방향의 음영구역 및 주파수특성 해석과 좋은 일치를 보였다.

ABSTRACT

Sound propagation in a sloping sea bed ocean environment demonstrates ray curvature in a direction parallel to the shoreline. The theoretical analysis of this shows that an ensonified region and a shadow region are formed, and their spatial extents depend on the spatial coordinates of source and receiver, a sloping angle and source frequency. The purpose of this experimental study using a sloping sea bed model is to check the theoretical prediction as a part of an ongoing investigation in the real ocean environment.

The sloping sea bed model used in this experiment had an ideal pressure release boundaries and a sloping angle of 22.5°.

A single frequency signal and an impulsive signal were used as omnidirectional point sources. The spatial acoustic field characteristics in the across slope direction were measured using the former and the frequency dependent field characteristics in a specific point were obtained using the latter.

It has been found that the analysis for the spatial extent of shadow zone and the frequency dependent field characteristics in the across slope direction, has a good agreement with the theoretical solution.

* 국립부산수산대학교

I. 서 론

경사해저를 갖는 해양환경에서 해저 및 해면에서의 연속적인 음파의 반사는 음파궤적을 휘어지게 하여 해안선에 평행한 방향의 음파의 전파가 제한된다. 이 현상은 Fig.1과 같이 경사해저면에 대한 입사파와 반사파가 동일 평면상에 존재하지 않기 때문으로 Fig.2와 같이 점음원에 의한 음장은 음장구역(ensonified region)과 음영구역(shadow region)으로 구분된다. ray 이론[1-3]으로 설명되는 상기의 해석은 음장의 전체적 해석으로서는 불충분하여 PE모델[4]이나 normal mode 모델[5-9]이 경사해저의 음장해석에 필수적이다. 그러나 현재까지 연구된 대부분의 해양 음장해석 모델들은 해저경사각이 아주 완만하다는 조건을 가정하여 해안선에 수직한 외해 방향 평면상의 2차원적인 음파전달 특성에만 국한되어 있다. 따라서 해저경사각이 상대적으로 큰 경우 해안선에 평행한 방향의 음장특성을 포함하는 3차원적인 해석을 위해서는 새로운 모델이 요구된다. 최근 Buckingham[10]은 완전 반사조건을 갖는 경사해저 영역에 대해서 경사각에 대한 제한 조건이 없는 3차원적 음장특성의 이론적 해를 제안하였다. 이러한 이론적 연구외에 Wood[11]와 Buckingham[12]은 실험적으로 경사해저의 음장특성을 해석하였으나 전자는 이론적 해석의 뒷받침이 없는 정량적인 결과였고 후자는 이론을 검증하기 위한 실제 해양실험으로 이론에 맞는 결과를 얻었으나 측정자료 부족으로 결과는 제한적이다.

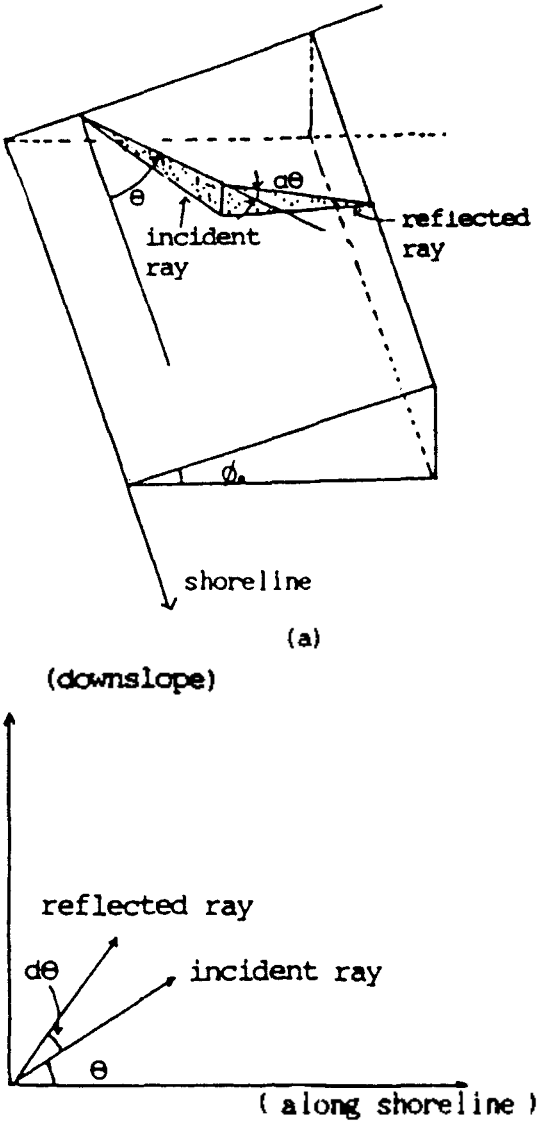


Fig. 1. (a) Geometry for a single reflection.
(b) Plan view of ray geometry.

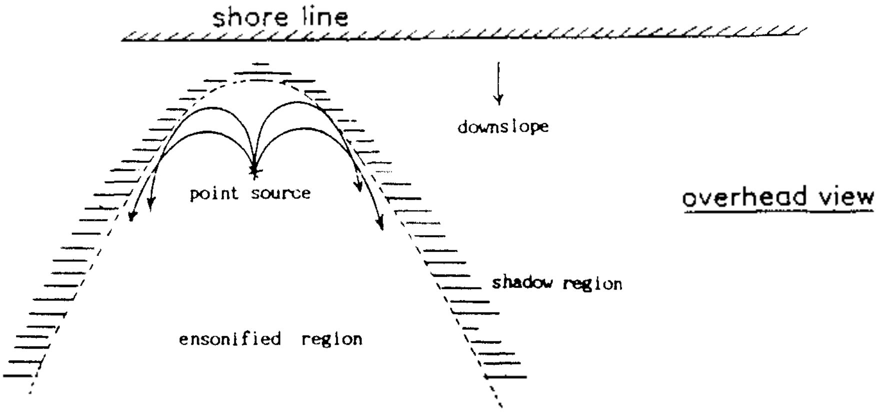


Fig. 2. Illustration of acoustic field characteristic in a sloping sea bed from a point source.

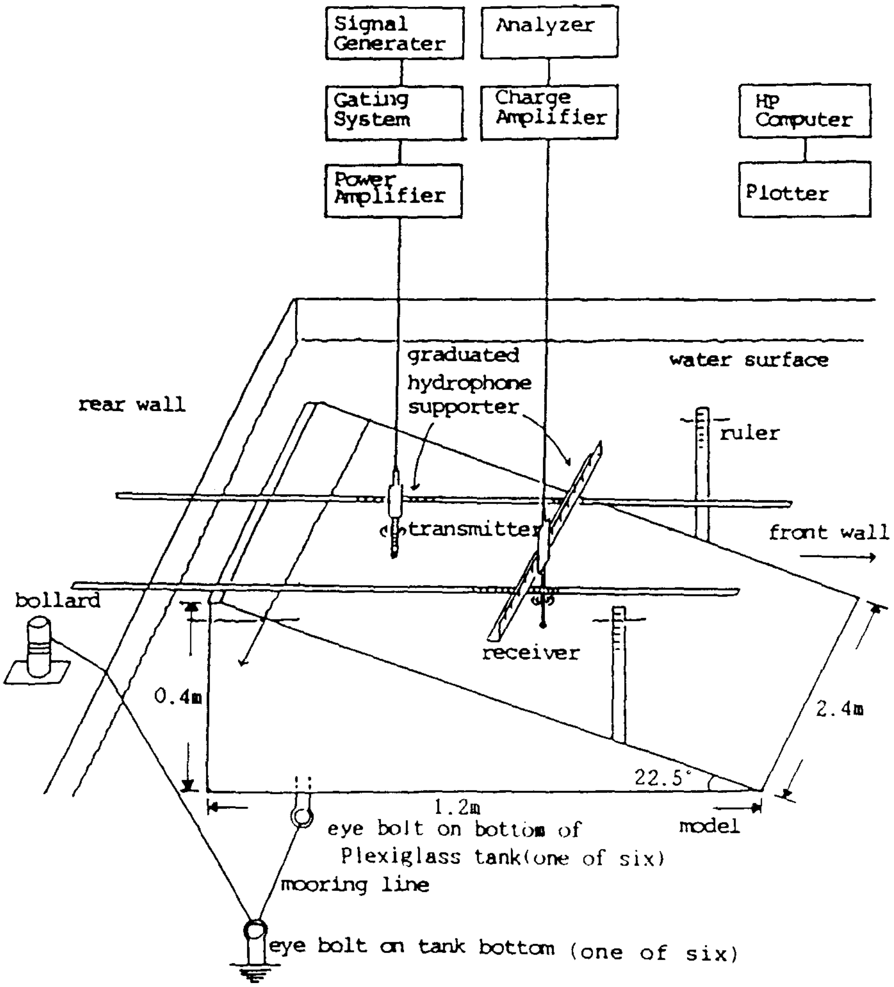


Fig. 3. Schematic diagram of experimental arrangement. A triangular, air-filled Plexiglass tank is submerged in a water tank. The thickness of the plexiglass is 12.7mm.

본 연구의 목적은 Buckingham이 구한 pressure-release 경계조건을 갖는 경사해저의 음장에 대한 이론적 해석을 실험으로 검증하기 위한 것이다. 실험은 Fig.3과 같이 수조에 12.7mm 두께의 Plexiglass로 된 속이 빈 모형통을 설치하여 모형통의 윗면이 경사해저면이 되도록 하였다. 이때 경사면의 반사계수는 -0.997로 거의 완전 반사에 가까운 조건이었다. 송신은 그림에서와 같이 수신기보다 해안쪽에 [illegible]

평행한 방향으로 이동시키면서 수신된 신호를 측정하였다. 경사각은 수조 바닥에 고정된 모형통의 [illegible] 조절하여 [illegible] 유지하도록 하였다. 위의 [illegible] 단순화된 경사해저에 대한 이론 [illegible] 실험과의 비교 [illegible] 복잡한 실제 해양 [illegible] 음향특성의 이론 및 실험 [illegible] 해석에 [illegible] 기대된다.

Ⅱ. 이 론

[illegible] Buckingham[illegible] normal mode[illegible] Fig.4[illegible] S[illegible] R[illegible] ϕ[illegible] $(r', \phi', 0)$[illegible] Φ[illegible] Helmholtz[illegible]

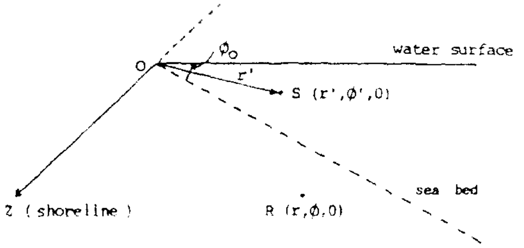


Fig. 4. Cylindrical coordinate system for the sloping sea bed. $S(r', \phi', 0)$ is source position, $R(r, \phi, z)$ is receiver position and water surface at the $\phi = 0$ plane and the sea bed at $\phi = \phi_0$.

$$\nabla^2\Phi + K^2\Phi = -Q\delta(r-r')\delta(\phi-\phi')\delta(z) \qquad (1)$$

여기서 해면 및 해저는 [illegible]

$$\Phi(r, 0, z) = \Phi(r, \phi_0, z) = 0 \qquad (2)$$

Q는 [illegible] Dirac-delta [illegible]

[illegible]

modal [illegible]

[illegible]

이 π의 약수인 경우 식(1)의 해가 되지 못한다[10]. Buckingham은 경사각이 π의 약수인 경우에 대해 식(1)의 해를 유도하였고 [illegible] 다음과 같이 [illegible]

$$\Phi = \frac{\phi}{Q} \sum [illegible] \qquad (3)$$

여기서

$$I_\nu = \frac{1}{\pi R_a} \int \frac{\cos(\nu\sigma)\exp[-iKR_a(1-2a\cos(\sigma))^{1/2}]}{(1-2a\cos\sigma)^{1/2}} d\sigma \qquad (4)$$

$$R_a = (r^2 + r'^2 + z^2)^{1/2}, \quad a = rr'/R_a^2 \qquad (5)$$

$$\nu = m\pi/\phi_0 \qquad (6)$$

[illegible] mode number[illegible]

[illegible]

1. 최대 모드수와 음영구역

식(4)[illegible] I_ν[illegible] $\cos(\nu\sigma)$[illegible] $\exp[-iKR_a U(\sigma)]$ [illegible] $U(\sigma)=(1-2a\cos\sigma)^{1/2}$[illegible] $\cos(\nu\sigma)$는 [illegible] σ[illegible] σ가 $0-\pi$ 사이에 있을때 $\exp[-iKR_a U(\sigma)]$가 [illegible] 함수 $\exp[-iKR_a U(\sigma)]$의 [illegible]

$$\partial KR_a U(\sigma)/\partial\sigma = KR_a a\sin(\sigma)/(1-2a\cos(\sigma))^{1/2} \qquad (7)$$

[illegible]

$$\partial KR_a U(\sigma)/\partial\sigma|_{max}$$

$$= KR_a [illegible] \qquad (8)$$

로 주어지고 최소값은 영이 될 것이다. 그러므로 모드 $m=\nu\phi_0/\pi$가 음장에 기여할 수 있는 진폭을 갖기 위해서는 식(8)로 주어지는 주파수 ν 보다 커야만한다. 즉

$$m=\nu\phi_0/\pi < [\partial(KR_0\ U(\sigma)\ )/\partial\sigma]_{max}\cdot\phi_0/\pi \quad (9)$$

로 주어져야 한다. 식(9)로 부터 최대 모드수 M은 다음식과 같이 결정될 수 있다.

$$M=\mathrm{Int}\ [KR_0\phi_0(1-(1-4a^2)^{1/2})^{1/2}/2^{1/2}\pi] \quad (10)$$

식에서 M은 경사각, 주파수 및 음원과 수신기의 위치에 좌우되는 음장에 기여되는 최대모드수로 Int[ ]는 정수 부분을 의미한다. Fig.5는 식(10)을 이용하여 구한 주어진 인자들에 대한 최대모드수를 표시하고 모드수가 주어지지 않는 영역이 에너지가 전파되지 않는 음영구역을 나타낸다. 음원은 단일 주파수 신호로 가정했고 경사해저의 z=0 평면을 기준으로 음장은 좌우 대칭이므로 한쪽 부분만 표시되었다. Fig.5에서 음장구역은 외해쪽으로 갈수록 발산함을 보이고 낮은 모드에 대한 음장은 높은 모드의 음장을 포함한다. 또한 m번째 모드의 에너지가 해안선 방향으로 더이상 전파되지 못하는 최외각 범위는 cut-off range로 정의된다.

2. 해안선 방향의 각 모드 간섭현상

각각의 모드의 진폭은 식(4)로 주어진다. 음원의 위치좌표 r'및 음원주파수가 일정할 때 진폭은 수신기의 위치좌표 r과 z에 의해 좌우되어 간섭형태를 갖게된다. Fig.6은 해안선에 평행한 방향 즉 z좌표에

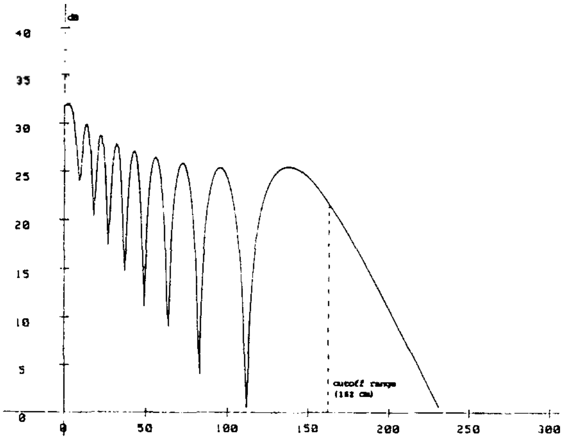


Fig. 6. Variation of level for mode 1 in across slope direction for the same parameters as those for Fig.5 receiver range r is 50cm.

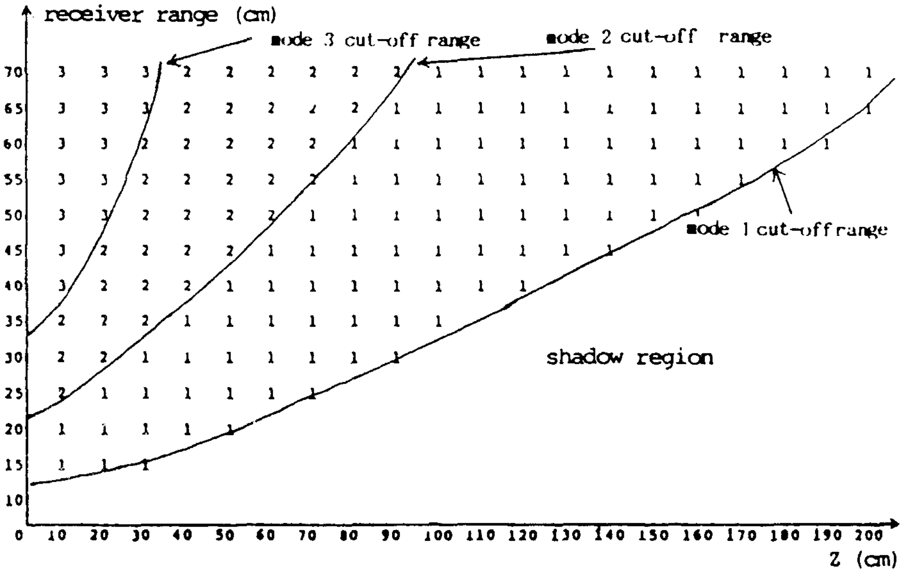


Fig. 5. Maximum mode number computed from equation (10). Source range : 10cm ; Sloping angle : 15 degress : Frequency : 25KHz.

의한 모드 1의 전형적인 간섭형태이다. 이러한 간섭현상은 Fig.3에서 보인바와 같이 음원에서 서로 다른 방향으로 진행되는 음파가 임의의 z좌표에 위치한 수신기에 도달하여 상호간섭을 일으키는 특성으로 진동하는 성질을 보인다. 그림에서 cut-off-range는 162cm로 Fig.5에서 수신기 위치좌표 r=50cm에 해당하는 모드 1의 최외각 범위와 일치한다. 식(4)로 부터 해석되는 또다른 음장특성은 음원 및 수신기의 위치좌표가 일정할 때 음원주파수에 따른 간섭형태로 이경우 우선 식(10)을 이용하여 주파수에 따른 최대모드를 결정한후 식(3) 및 식(4)를 이용하여 얻어지는 주파수별 모드 간섭특성이다. Fig.7은 주파수 함수로 표시된 간섭형태의 예를 보인다. 그림에 표시된 m번째 모드의 cut-on 주파수 fmcuton은 식(10)의 변형된 형태로 다음 식으로 주어진다.

$$f_{m\,cuton}=mc/(R_0\ \phi_0\ 2^{1/2}(1-(1-4a^2)^{1/2})^{1/2}) \qquad (11)$$

여기서 c는 매질내의 음속이다. 즉 $f_{m\,cuton}$은 음원 및 수신기의 위치좌표가 일정할 때 음장에 기여될 수 있는 주파수범위를 나타낸다. Fig.7의 (a), (b)는 z좌표값에 따른 $f_{m\,cuton}$ 변화를 보인것으로 z의 증가에 따라 각 모드의 cut-on 주파수가 증가됨을 보인다. 다시말하면 z가 증가하면 상대적으로 낮은 주파수는 음장에 기여하지 못하게 되어 여과되는 성질을 보여 높은 주파수의 음장 영역에 포함됨을 보이고 높은 주파수의 음영구역이 낮은 주파수의 음영구역보다 작음을 보이는 것이다.

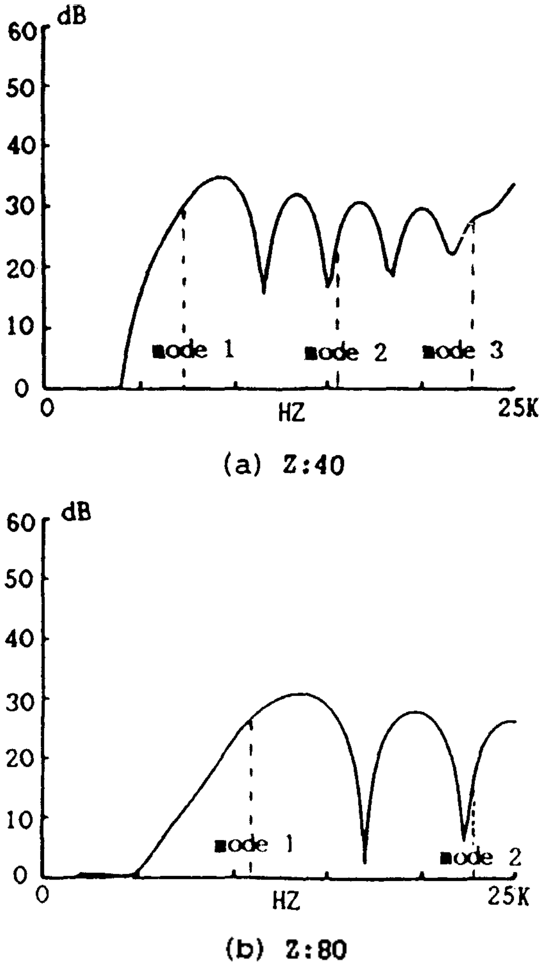


Fig. 7. Spectrum of acoustic field at two different points in Z direction showing mode interference effects and mode cut-on frequencies Source range r' is 37.5cm at middepth. Receiver range r is 14cm. Sloping angle is 15° and receiver angle is 3.75° (a) z=40cm, (b) z=80cm

Ⅲ. 실험결과

Fig.5~7에서 보인 경사해저의 음장특성이 수신기 위치 및 음원주파수에 따라 측정되었다. 음장 및 음영구역 범위 및 간섭현상에 대한 특성 측정을 위해 주파수 7.5KHz와 8KHz의 연속 단일주파수 [illegible] 고 이 조건에서 음원은 모드 1만의 에너지를 전파하고 또한 경사해저 모델의 실험 영역이내에 음영구역과 음장구역이 존재한다. z축 방향에 대한 특성을 측정하기 위해 음원은 고정(S(37.5, 11.25, 0)) 시키고 수신기는 z축에 평행한 방향으로 이동시키면서 5cm 간격으로 음압을 측정하였다. 또한 음장구역의 외해 방향으로의 발산특성을 규명하기 위해 수신기의 위치좌표 r을 변화시키면서 측정하였다. Fig.8-(a),(b)의 각각은 수개의 수신기 위치 좌표 z 및 r에 대한 실험결과로 z가 특정거리 이상이며 지표으 [illegible] 이내에서는 간섭현상을 보인다. 또한 r값의 증가 즉 외해 방향으로 갈수록 음장구역이 발산함을 보인다. Fig.8 (a), (b)는 서로 다른 주파수에 대한 비교로 주파수 증가에 따라 음장구역의 범위가 증가하고

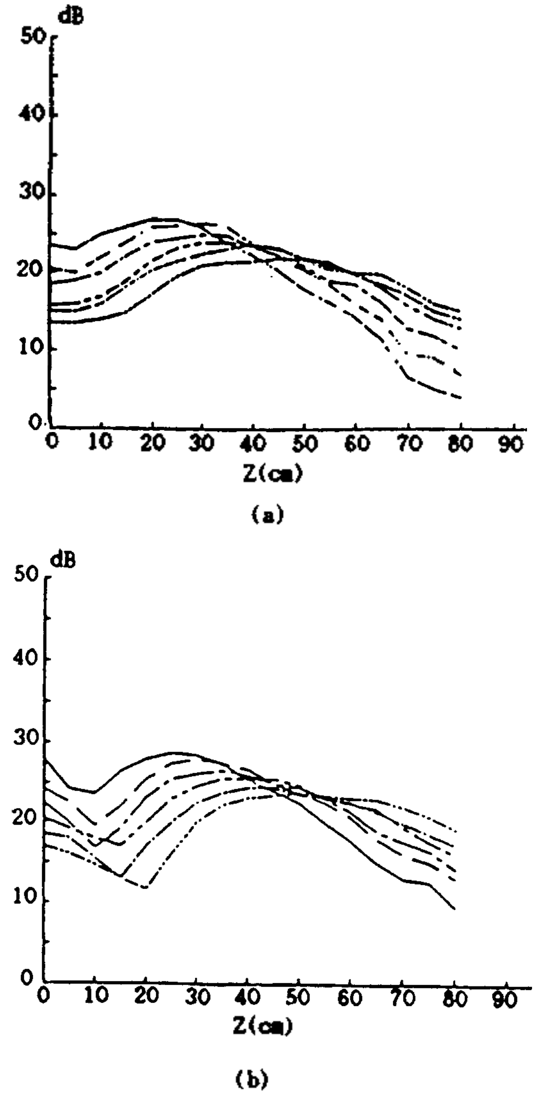


Fig. 8. Variation of meaured level in the across slope direction for a series of receiver ranges. (a) 7500Hz (b) 8000Hz

Receiver range : 44.16cm	59.46cm
49.26cm	64.56cm
54.36cm	69.66cm

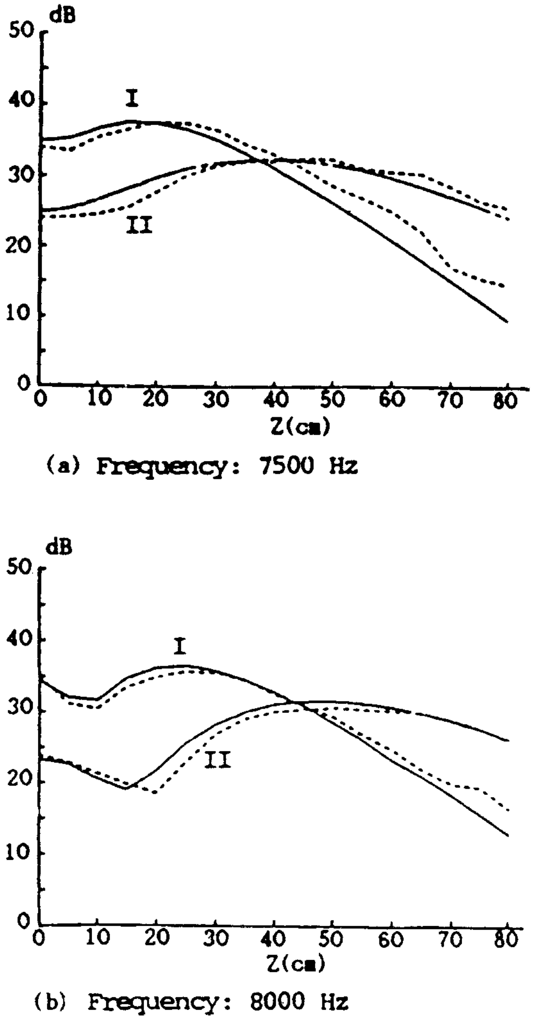


Fig. 9. Variation of level in the across slope direction for receiver ranges of r=44.16 and 69.66cm
Dotted lines show experimental results and solid lines show theoretical results. Source range r'=37.5cm.
CurveI : received at 44.16cm ; CurvesII received at 69.66cm.

간섭현상의 정도가 심해짐을 보인다. Fig.9는 Fig.8의 결과를 이론적 결과와 비교한 것으로 ±2.5dB 이내에서 상호 좋은 일치를 보인다.

II-2절 및 Fig.7에서 보인 주파수 및 z좌표에 대한 음장특성을 얻기위해 음원으로 충격음원을 사용하였다. Fig.10은 충격음원의 신호특성으로 Fig.10-(a)는 Fig.2에서 송신기에 입력되는 시간신호이고 Fig.10-(b),(c)는 각각 수신기에서 사유장의 조선에서 측정된 시간신호 및 스펙트럼 특성이다. Fig.11은 충격음원을 사용한 실험결과와 Fig.7의 이론치를 비교한 것으로 cut-on주파수는 z의 증가에 따라 증가함을 보이고 z가 증가하면 사유장에서 측정된 충격음원 신호의 낮은 주파수는 이러되어 실파적 차단되고 높은 주파수의 모드만이 실질적으로 전파됨을 보인다. 결론적으로 해안선에 평행한 z방향에서 저주파수의 음향에너지는 고주파수보다 크게 변하며 크고 뚜렷한 간섭현상으로 나타난다. 이론치와 비교시 ±5dB 이내에서 잘 일치함을 보인다.

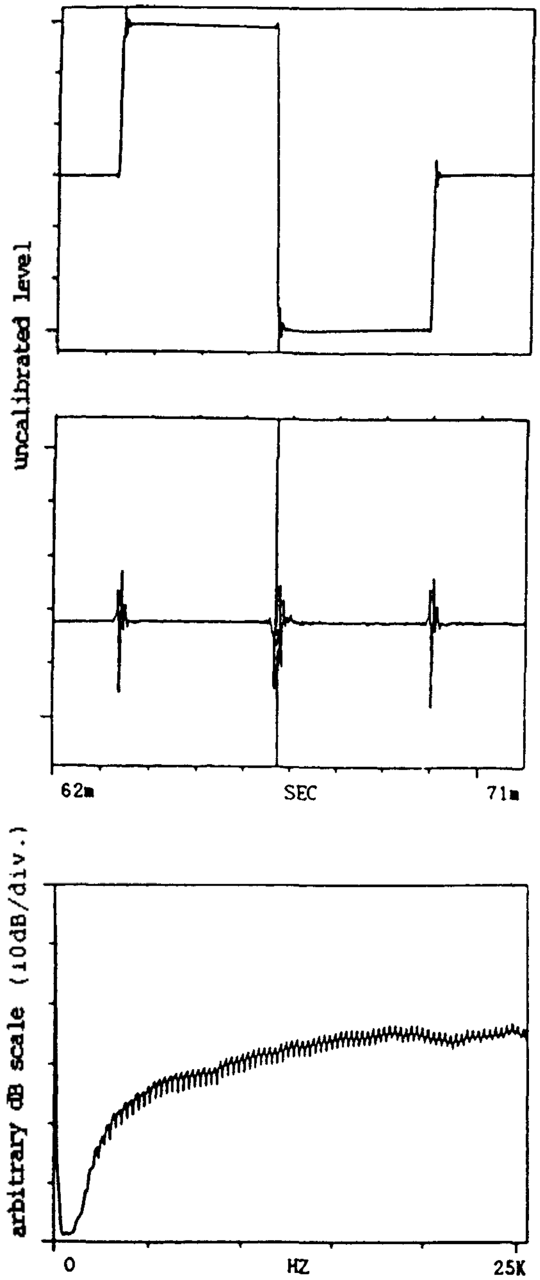


Fig. 10. Impulsive signal characteristics under free field conditions.(a) Input time signal to transmitter.
(b) Received time signal at receiver
(c) spectrum of received time [illegible] to 25.6KHz.

Ⅳ. 결　　론

본연구의 목적은 이상적인 pressure release 경계조

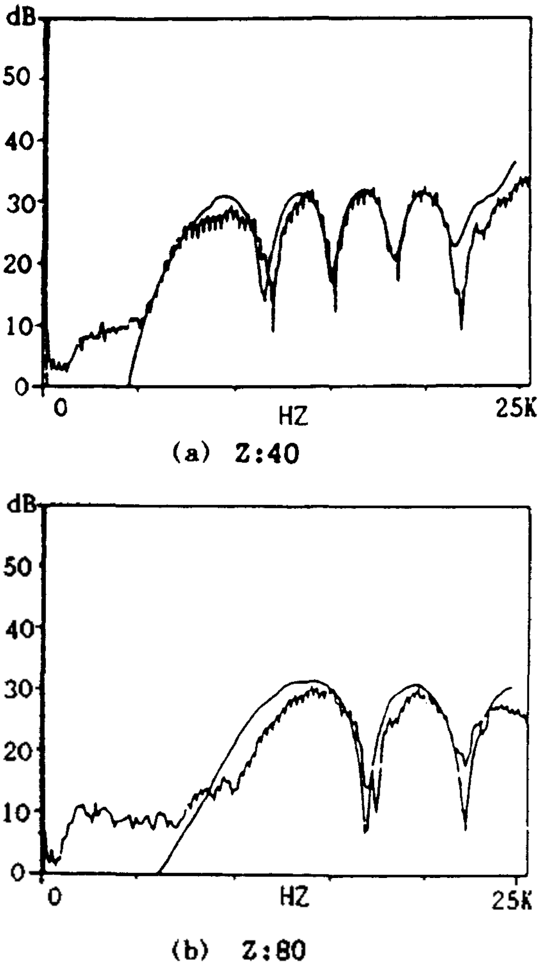


Fig. 11. Spectra at various z ranges, source is 37.5cm at middepth. The two curves show the comparison between measurements (jagged line) and theory (continuous line).

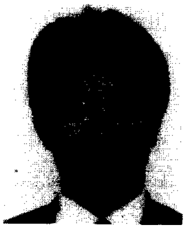
기울 갖는 경사해저 모형을 만들어 이에대한 해안선에 평행한 방향의 이론적 음장특성과 실험결과를 비교하고자 하였다. 실험은 수조에 plexiglass로 된 [illegible] 모형틀을 설치하여 이상적인 경계조건을 만족하는 경사해저 영역을 만들어 수행되었다. 상대적으로 해저경사각이 작은 조건에서 Buckingham의 이론해가 보이는 음장특성은 해안선 방향에 평행한 [illegible] 외해방향으로 갈수록 음장구역의 범위는 발산함을 보인다. 또한 음장구역내의 특성은 간섭형태를 보인다. 이러한 특성은 해저경사각, 음원 및 수신기의 위치좌표, 주파수등에 좌우된다. 경사각을 22.5°로

하고 단일주파수 음원신호를 사용하였을 때 수신기 위치 좌표r와 주파수 변화에 따른 음장특성은 ±2.5dB이내에서 이론으로 예측되는 결과와 일치하였다. 또한 광대역 충격음원을 사용한 음장특성 실험에서는 이론적으로 계산되는 해안선 방향의 cut-on 주파수 특성 및 주파수별 전파범위가 ±5dB의 정확도로 잘 일치하는 결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 적용된 단순화된 경사해저 모형에 대한 음장 실험결과는 복잡한 실제 해양 조건에 대한 이론 및 실험적 응용연구의 기초 자료가 될 것이다.

참 고 문 헌

1. D.E. Weston, "Guided Propagation in a Slowly Varying Medium," Proc. Phys. Soc., 73, 365-384, 1959.
2. D.E. Weston, "Horizontal Refraction in a Three-Dimensional Medium of Variable Stratification," Proc. Phys. Soc., 78, 46-52, 1961.
3. H.Weinberg and R.Burridge, "Horizontal Ray Theory for Ocean Acoustics," J.A.S.A., 55(1), 63-79, 1974.
4. C.H. Harrison, "Three-Dimensional Ray Paths in Basins, Troughs, and near Seamounts by Use of Ray Invariants," J.A.S.A., 62(6), 1382-1388, 1977.
5. C.H. Harrison, "Acoustic Shadow Zones in the Horizontal Plane," J.A.S.A., 65(1), 56-61, 1979.
6. F.B. Jensen and W.A. Kuperman, "Sound Propagation in a Wedge-Shaped Ocean with a Penetrable Bottom," J.A.S.A., 67(5), 1564-1566, 1980.
7. A.D. Pierce, "Extension of the Method of Normal Modes to Sound Prpagation in an Almost-Stratified Medium," J.A.S.A., 37(1), 19-27, 1965.
8. D.L. Bradley and A.A. Hudimac, "The Propagation of Sound in a Wedge Shaped Shallow Duct," Naval Ord. Lab. Rept. NOLTR 70-235, 1970.
9. R.D. Graves, A.Nagl, H.Uberall, And G.L.Zarur, "Range-Dependent Normal Modes in Underwater Sound Propagation : Application to the Wedge Shaped Ocean," J.A.S.A., 58(6), 1171-1177, 1975.
10. M.J. Buckingham, "Acoustic Propagation in a Wedge-Shaped Ocean with Perfectley Reflecting Bounderies," NRL Report 8793, 1970.
11. A.B. Wood, "Model Experiments on Sound Propagation in Shallow Seas," J.A.S.A., 31(9), 1213-1235, 1959.
12. R.Doolittle, A.Tolstoy, and M.J. Buckingham, "Experimental Confirmation of Horizontal Refraction of Sound Propagation in a Wedgelike Ocean," J.A.S.A., 78(S1), 1985.
13. S.A.L. Glegg and J.R. YOOn, "Experimental Measurements of Three-dimensional Propagation in a Wedge-shaped Ocean with Pressure-release Boundary Conditions," J.A.S.A., 87(1), 101~105, 1990.

▲윤 종 락(정회원) 1954년 6월 17일생



1977년2월 : 부산 수산 대학교 어업학과 졸업
1980년2월 : 부산수산대학 대학원 수산 물리학과 졸업 (수산학 석사)
1987년8월 : 미국 Florida Atlantic Univ. 졸업(공학석사)
1990년4월 : 미국 Florida Atlantic Univ. 졸업(공학박사)
1979년3월~1985년6월 : 진해 기계창 근무(연구원)
1990년4월~현재 : 부산 수산대학교 전임강사