

천해 내부파에 의한 음파의 모드간섭

나영남, 박정수, 정문섭, 최진혁
(국방과학연구소)

Mode Interference of Acoustic Waves Due to Internal Waves in Shallow Water

Young-Nam Na, Joung-Soo Park, Moon-Sub Jurng, Jin-Hyuk Choi
(Agency for Defense Development)
E-mail : ynna@sunam.kreonet.re.kr

요 약

최근의 연구에서 해양의 내부파가 음파의 전달에 영향을 주어 비정상적인 손실을 일으키는 것으로 밝혀졌다. 인연의 실험을 통하여 한국 동해에도 강한 수온약층을 중심으로 한 내부파가 존재하는 것으로 밝혀졌으며, 음원과 수신기를 이용한 실험을 통해서도 관측된 내부파의 주기에 해당하는 음파의 변동 특성이 확인되었다. 내부파가 음파의 전파에 영향을 미치는 것은 모드간 간섭을 통하여 이루어진다. 본 논문에서는 모드간섭의 이론적 설명과 함께 음향모델을 통하여 내부파의 영향을 추정하였다. 모델링 결과 내부파는 음파의 모드간 에너지 전이를 일으켜서 에너지를 산란시키는 효과가 있는 것으로 보인다. 한편 거리독립 환경과 내부파가 존재하는 환경간에는 주파수 1 kHz를 기준으로 하여 거리에 따라 약 10 dB까지의 전파손실 차이를 나타낸다.

I. 서 론

내부파와 조석은 천해 해양학에서는 간과할 수 없는 중요한 현상 중의 하나이다. 충분히 강한 수직적 밀도구배 (Thermocline, 수온약층)가 존재할 경우 부력에 의해 복원되는 진동이 생길 수 있다. 내부파와 조석은 수온과 음속을 수조에서부터 수시간까지의 주기를 갖고 변화함으로써 천해와 심해에서 모두 혼합과 에너지 전달의 중요한 기작이 되고 있다[1]. 음향학적으로 수온의

변동은 음속의 변화를 일으켜서 전파되는 신호의 전파 시간 변동을 일으키게 한다.

내부파와 관련된 음파의 변동 연구 기법은 그동안 많이 연구되어 왔다. 심해에서는 음선이론에 기초한 기법이 유용한 것으로 밝혀졌다[2]. 천해인 경우 Essen [3]은 모드섭동에 기초한 위상변화 분석을 시도하였다.

최근의 논문에서 Lynch 등[4]은 모드 이론과 음선이론에 근거한 섭동기법을 이용하여 예측된 전파시간 변동과 Barents 해 극진선(BSPF: Barents Sea Polar Front) 실험의 결과를 비교하였다. 그 결과 두 이론의 결과는 비교적 잘 일치하였다.

한편 Tindle과 Guthrie[5]는 일군의 모드들이 보강간섭을 일으켜 특정 음선경로를 형성함을 밝혀 냈으며, Traykovski [6]는 이들 보강간섭이 내부파에 의해 유발된 수 있음을 주장하였다.

한국 근해에서 내부파와 이에 따른 음파의 전파특성을 동시에 규명하고자 해양과 음향 실험을 수행하였다 [7]. 그 결과 동해에서 관측된 내부파는 전형적으로 주기가 5-12분이고 최대 진폭은 15m 정도임이 밝혀졌다. 수직선배열 수신기와 음원을 이용한 음향실험 결과 역시 4-12분 주기에서 음장의 스펙트럼 준위가 높게 나타났다.

본 연구에서는 한국 동해에서 나타난 내부파의 특성을 바탕으로 내부파를 재현한 다음 이를 음향모델에 적용하여 내부파에 의한 영향을 살펴보고자 한다.

II. 내부파에 의한 모드간 간섭

내부파에 의한 음파 모드간 결합 (Mode Coupling)은 쉽게 계산이 가능하다. 원거리에서 소멸되는 모드들을 무시하면 주어진 주파수에서는 몇개의 모드만이 남는다. 흔히 쓰이는 포물선 방정식에 기초하여 구한 해인 $[\Phi_{PE}(r, z)]$ 는 다음과 같이 국지적 모드 고유함수인 $[U_n(z)]$ 들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi_{PE}(r, z) = \sum_n A_{PEn}(r) U_n(z), \quad (1)$$

여기에서 $U_n(z)$ 는 표층과 지층에서의 경계조건 및 다음의 비분 방정식을 만족한다.

$$\frac{d^2 U_n}{dz^2} + [k^2(z) - k_n^2] U_n = 0, \quad (2)$$

여기에서 k_n 은 고유치 (모드 파수)이다. 모드 고유함수는 또한 다음의 정규화 조건을 만족한다.

$$\int \rho(z) U_n(z) U_m(z) dz = \delta_{n,m}. \quad (3)$$

식 (1)의 양편을 $U_m(z)$ 로 곱하고 수직에 따라 적분하면 (식 (3)을 이용) 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$A_{PEm}(r) = \int \rho(z) \Psi_{PE}(r, z) U_m(z) dz. \quad (4)$$

내부파가 존재하지 않는 거리에서 첫번째 모드가 작용한 후에 1차 모드에 대한 고차 모드의 상대적 진폭 A_m 은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{|A_{PEm}(r)|}{|A_{PE1}(r)|} \\ &= \frac{\left| \int \rho(z) \Phi_{PE}(r, z) U_m(z) dz \right|}{\left| \int \rho(z) \Phi_{PE}(r, z) U_1(z) dz \right|} \\ &= \left(\frac{A_{mR} + A_{mI}}{A_{1R} + A_{1I}} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

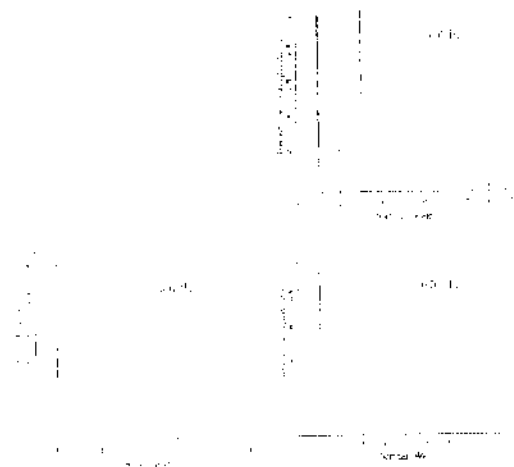
여기에서

$$A_{mR} = \left(\sum_{j=1}^m \rho_1 \Phi_R(r, z_j) U_m(z_j) + \sum_{j=m+1}^M \rho_2 \Phi_R(r, z_j) U_m(z_j) \right)^2,$$

$$A_{mI} = \left(\sum_{j=1}^m \rho_1 \Phi_I(r, z_j) U_m(z_j) + \sum_{j=m+1}^M \rho_2 \Phi_I(r, z_j) U_m(z_j) \right)^2.$$

위의 식에서 $\Phi_R(r, z_j), \Phi_I(r, z_j)$ 는 각각 j 번째 수신 격자에서 계산된 음상의 실수, 허수 부분이다. 또한 M 은 층의 수이고 수층-해저의 경계면은 m 번째와 $(m+1)$ 번째 층 사이에 존재한다.

A_m 은 1차 모드에서 고차 모드로 진이된 에너지의 정도를 나타내는 척도이다. 이렇게 모드를 계산할 수 있는 프로그램을 이용하여 포물선 방정식으로부터 얻어진 음장을 여러 모드들로 분해할 수 있다. 포물선 방정식에 입력되는 음장은 1차이다. 만약 모드 결합이 없다면 이 1차 모드만이 존재할 것이다. 전파중에 내부파가 존재하는 거리 이상에서는 1차 모드 에너지의 일부가 고차 모드 영역으로 전이되게 된다. 일반적으로 고차 모드는 해저면에 접촉하여 급속하게 모드간 간섭과 변동을 일으킨다. Zhou와 Zhang [8]은 내부파에 의한 모드간 간섭으로 비정상적으로 큰 진폭손실이 초래될 수 있음을 보였다. <그림 1>은 이들의 연구결과와 하나로 시 주파수에 따른 모드간 에너지 변이를 단적으로 나타내 주고 있다. 음원-수신기간 거리가 18km이고 내부파가 거리 15-16.41km (파장은 235m) 사이에 존재한다. 그림에서 3개의 주파수중 630Hz가 제 1모드에서 고차 모드로의 에너지가 가장 활발함을 볼 수 있다.



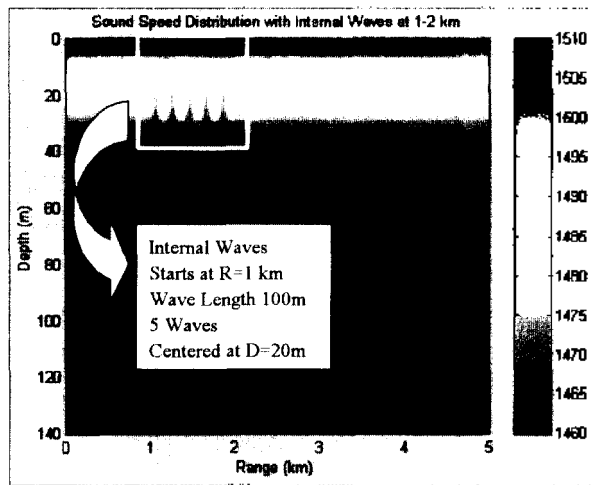
<그림 1> 음원-수신기간 거리 18km이고 내부파가 15km에서 시작되는 경우의 주파수별 모드별 상대 진폭

III. 내부파에 의한 음장변화 모델링

내부파가 존재할 경우 음장변화를 살펴보기 위해 적절한 내부파를 가정하였다. 즉 내부파가 존재하는 수심을 a , 파장을 λ 라 할때 거리 r 에서의 수심변화 $z(d)$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$z(d) = d - A(d) \sin(2\pi r/\lambda), \quad (6)$$

여기에서 $A(d) = 10 \cos(120 - d\pi/20)$, $10 \leq d \leq 30$ 이다. 내부파 변동의 중심은 20m이고 파장은 200m이며, 전체깊이는 1km가 되도록 설정하였다. 그리고 내부파는 음원으로부터 1km 기점에 존재하도록 하였다. <그림 2>는 모델링에 이용된 수층의 구조와 내부파 특성을 나타낸다.

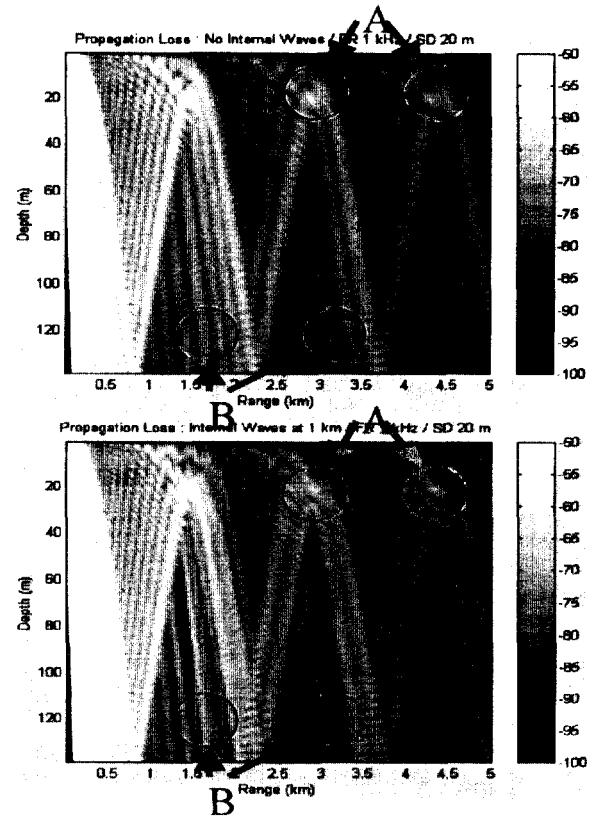


<그림 2> 모델링에 입력된 수층의 구조와 내부파 특성

음향모델에 입력된 지구음향 자료는 sand-silt-clay 의 특성($\rho_s = 1500 \text{ kg/m}^3$, $c_s = 1500 \text{ m/s}$, $\alpha_s = 0.8 \text{ dB}/\lambda$)을 적용하였다. 전체 수심은 140m이고 음원은 수온약층이 존재하는 수심 20m에 설정하였다. 음향모델은 포동선 방정식을 Pade' 근사법을 적용시킨 RAM 모델[9]을 이용하였다.

<그림 3>은 내부파가 존재하지 않을 경우와 존재할 경우의 전파손실 (dB) 분포를 대비시켜 나타낸다. 두 결과를 살펴보면, 거리 1km까지는 두 결과가 동일하나, 그 이후에는 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다. 즉, 그림에서 'A'로 표시된 영역은 표층 에너지 수렴구역인데, 내부파가 존재하지 않을 경우에 비해서 내부파가 존재할 경우에는 수렴구역의 형상 제그리짐이 두드러진

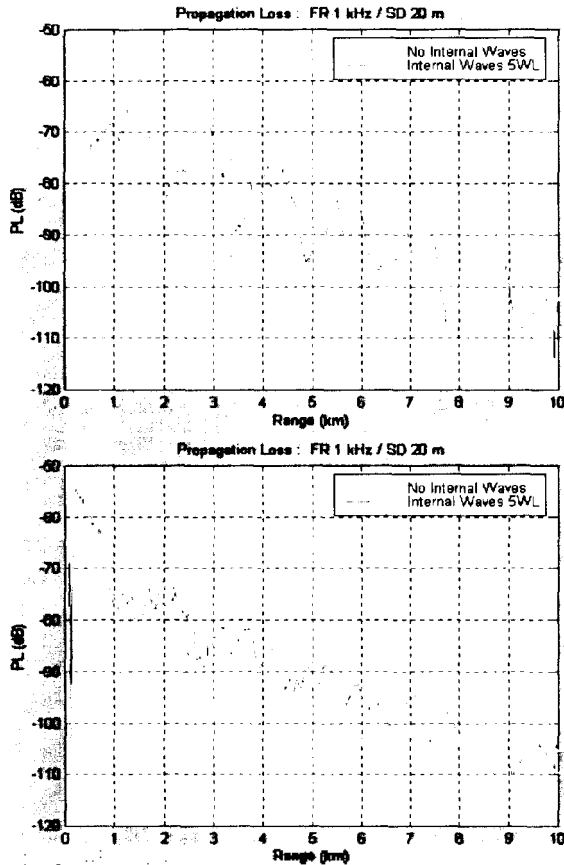
다. 또한 해저면에 접촉하기 전의 전파손실 분포인 'B' 영역에서도 두 그림의 차이는 쉽게 발견된다.



<그림 3> 내부파가 존재하지 않을 경우(상)와 존재할 경우(하)의 수심-거리별 전파손실 분포

차이를 좀 더 정량적으로 살펴보기 위하여 음원이 위치한 수심 20m와 140m의 전파손실을 추출하여 그래프로 나타내었다 (<그림 4>). 수심 20m인 경우 내부파가 존재하지 않을 경우에는 거리 약 1.4km마다 규칙적으로 음파 에너지 수렴구역이 형성되어 있으나, 내부파가 존재하는 경우에는 이러한 수렴구역이 분산됨을 볼 수 있다. 그리고 이러한 경향은 거리가 증가함에 따라 증가한다. 140m의 결과도 수심 20m의 경우보다는 뚜렷하지 않으나 내부파가 존재할 경우 음파 에너지 수렴구역이 분산되며, 일부는 위상도 어긋나고 있음을 보이고 있다. 내부파가 존재할 경우의 이러한 특성은 음파의 모드간 결합으로 나타나는 일종의 간섭 현상으로써 설명이 가능하다. <그림 4>에서 내부파의 존재 유무에 따라 최대 10 dB까지의 전파손실 차이가 발생할 수 있음을 볼 수 있다.

참고 문헌



<그림 4> 수심 20m(상)와 140m(하)에서의 전파손실

IV. 결 론

본 논문에서는 수중 음파 모드간섭의 이론적 설명과 함께 음향모델을 통하여 내부파가 음파의 전파에 끼치는 영향을 추정하였다. 모델링 결과 내부파는 음파의 모드간 에너지 전이를 일으켜서 에너지를 산란시키는 효과가 있는 것으로 보인다. 거리독립 환경과 내부파가 존재하는 환경간에는 주파수 1 kHz를 기준으로 하여 거리에 따라 약 10 dB까지의 전파손실 차이를 나타낸다.

앞으로 내부파 실험과 음향 실험을 동시에 실시하여 내부파에 의한 영향 메커니즘을 명확하게 밝혀내는 것이 요구된다.

- [1] C. Garret and W. Munk, "Internal waves in the ocean," *Fluid Mech.* Vol.11, 339-369, 1979.
- [2] S. Flatte', R. Dashen, W. Munk, K. Watson, and F. Zachariasen, *Sound Transmission through a Fluctuating Ocean*, Cambridge U. P., Cambridge, 1979.
- [3] H. H. Essen, F. Schirmer, and S. Sikes, "Acoustic remote sensing of internal waves in shallow water," *Int. J. Remote Sens.* Vol.4, 33-47, 1983.
- [4] J. F. Lynch, J. Guoliang, R. Pawlowicz, D. Ray, C. S. Chiu, J. Miller, R. H. Brouke, R. Parson, A. Plue Demann, and R. Muench, "Acoustic travel time perturbations due to the shallow water internal waves and internal tides in the Barents Sea polar front : Theory and experiment," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.99, 803-821, 1996.
- [5] C. T. Tindle and K. M. Guthrie, "Ray effects in the normal mode approach to underwater acoustics," *J. Sound Vib.* Vol. 47(3), 403-413, 1976.
- [6] P. Traykovski, "Travel-time perturbations due to internal waves : Equivalence of modal and ray solutions," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.99(2), 822-830, 1996.
- [7] Y. N. Na, J. S. Park, M. S. Jung, and J. H. Choi, "Time VARIation Characteristics of Internal Waves and Acoustic Pressures in Shallow Water," *J. Acoust. Soc. Kor. Youngnam Chap. Symp. Proc.* Vol. 5, pp. 18-24, 1998.
- [8] J. X. Zhou and X. Z. Zhang, "Resonant interaction of sound wave with internal solitons in the coastal zone," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 90(4), 2042-2054, 1991.
- [9] M. D. Collins, *User's Guide for RAM Versions 1.0 and 1.0p*, Naval Research Lab., USA, pp. 1-13, 1996.