

수중 음 전달에 대한 내부파의 영향

The Effect of Internal Waves on Acoustic Propagation

최 병 호*, 성 우 제**, 박 정 수***

(Byung-ho Choi*, Woojae Seong**, Joung-Soo Park***)

요 약

본 논문에서는 수중 음 전달에 대한 내부파의 영향을 파악하기 위하여 내부파에 의한 음속의 변화량을 수치적으로 구현하고 이를 바탕으로 내부파가 존재할 경우의 음 전달 실험을 수치적으로 수행하였다. 음 전달 수치 실험의 결과를 한국 동해에서 수행된 음향 실험 자료와 비교하였다. 수중 음 전달 수치 실험을 위해서는 Galerkin 방법을 이용한 고차포물선 방정식법(SNUPE)을 사용하였다. 음 전달에 대한 내부파의 영향을 파악하기 위하여 불규칙 계수(Scintillation index)를 사용하였고 이를 실제 음향 실험 자료와 비교하였다.

핵심용어: 내부파, GM 스펙트럼, 포물선 방정식, 불규칙 변동계수

투고분야: 수중음향 분야(5.1, 5.7)

ABSTRACT

Internal waves existing in the stratified ocean significantly affect acoustic propagation. In order to understand the effects of internal waves on acoustic propagation, the sound speed fluctuations due to internal waves are generated based on the Garrett-Munk spectrum which is derived from measured data in the East Sea. The acoustic propagation, where internal waves are present, is simulated numerically using a Galerkin higher order parabolic equation method(SNUPE). These results show favorable comparison to in-situ acoustic propagation data from the East Sea. To investigate the effects of acoustic propagation in random media, scintillation index is adopted and comparison between the measured and numerically simulated data is made.

Key words: Internal waves, GM spectrum, Parabolic equation, Scintillation index.

I. 서 론

수중 음의 이용은 수중방위체계, 해양 지질학, 해양 물리학 등 다양한 해양 분야에서 해양의 3차원적 이용을 위해서 광범위하게 연구되어왔다[1]. 수중 음을 이용한 시스템들이 성공적으로 운용되기 위해서는 무엇보다도 해양환경에 대한 충분한 이해가 있어야 한다. 특히 천해에서의 음 전달 현상에 관심이 높아지면서 음 전달에 대한 경계면의 영향이 증가하여 종합적인 해양환경의 이해가 더욱 중요한 요소로 대두되었다. 본 논문에서는 이러한 해양 환경 중 수중 음 전달에 상당한 영향을 주고 있는 것으로 알려진 내부파의 영향에 대해서 연구하였다.

심해환경에서 내부파에 관한 기존의 연구로는 Garrett과 Munk[2]에 의해서 제안된 실험적인 모델(GM-스펙트럼)이 있으며 이 모델은 심해 환경에서의 내부파를 성공적

으로 설명해 주고 있다. 심해에서 내부파를 통과하는 음 전달에 관한 연구는 GM-스펙트럼을 바탕으로 Flatte' 등[3], Tappert[4] 등에 의해서 수행되었다. 천해환경에서의 내부 파는 수면, 바다, 수직 전단력 등의 영향으로 심해에서와 같이 쉽게 파악할 수는 없으나 GM-스펙트럼의 변형을 통해서 설명할 수 있다. 천해에서 내부파의 영향을 고려한 수중 음 전달현상에 관한 연구는 Apel[5], Tielburger[6] 등에 의해서 연구되었다. 한국 근해의 내부파에 관한 연구는 1998년 수행된 동해에서의 실험[7]이 있다.

해양환경에 의한 음 전달에 대한 영향은 주로 음속의 변화를 통해서 이루어지고 이러한 음속의 변화는 시공간적인 크기에 따라 결정적 음속과 통계적인 음속으로 나누어진다. 내부파에 의한 음속의 변화량은 통계적인 음속에 속한다. 내부파에 의한 음속의 변화가 시공간에 따라 존재하므로 내부파의 영향을 고려한 음 전달 실험을 수행하기 위해서는 반드시 거리종속 다층구조 음 전달 모델을 사용해야 한다. 본 논문에서는 거리종속 다층 구조 음 전달 현상 파악에 적합한 Galerkin 방법을 사용한 고차 포물선 방정식 법[8]을 사용하였다.

* 서울대학교 대학원

** 서울대학교 조선해양공학과

*** 국방과학연구소

접수일자: 2000년 1월 31일

본 논문에서는 임의로 생성된 내부파를 사용하여 여러 번의 음 전달 수치실험을 수행하고 이로부터 얻어지는 불규칙 변동 계수를 통해서 음 전달에 대한 내부파의 영향을 파악하였다. 끝으로 본 논문에서는 실제 측정 자료를 사용하여 동해에서의 내부파에 의한 음속의 변화량을 구현하고 이를 바탕으로 내부파를 통과하는 음 전달 수치 실험을 수행하여 불규칙 변동계수를 얻고, 이를 실제 음향 실험 자료와 비교하여 보았다.

II. 내부파 역학

내부파는 같은 성질을 지니는 수파의 수직적인 움직임이 수평방향으로 진행되는 현상을 말하고 관성 주파수와 부력 주파수로 표현되는 관성력과 복원력으로 그 움직임을 유지한다. 해수면이 원점이고 깊이 방향이 z 인 좌표계에서 내부파의 지배 방정식은 다음과 같이 유도되어진다 [9][10].

$$\frac{d^2 W}{dz^2} + k_h^2 \left[\frac{N^2(z) - \omega^2}{\omega^2 - \omega_i^2} \right] W = 0 \quad (1)$$

여기서 $W(z)$ 는 내부파의 수직 속도 성분의 크기를 의미하며 k_h 는 내부파의 수평방향 파수,

$N(z) = \sqrt{-\frac{\rho}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}$ 로 부력 주파수, $\omega_i = 2\Omega \sin(\text{위도})$ 로 관성 주파수, 끝으로 ω 는 내부파의 주파수를 나타낸다. 앞에서 g 는 중력가속도, ρ 는 밀도, 그리고 Ω 는 지구 회전 주파수이다.

경계조건은 해수면과 해저면 z_D 에서 내부파의 수직 변위가 존재하지 않는 것이다. 즉,

$$W(0) = W(z_D) = 0 \quad (2)$$

내부파의 지배방정식은 Sturm-Liouville 문제이므로 그 해는 다음과 같은 표준화된 직교성을 갖는다.

$$\rho_0 \int_0^{z_D} (N^2(z) - \omega_i^2) W(j, k_h, z) W(i, k_h, z) dz = \delta_{i,j} \quad (3)$$

이렇게 표준화된 고유모드들의 수평파수 k_h 와 모우드 j 에 대한 중첩으로 다음과 같이 내부파의 수직 변위 ζ 를 표현 할 수 있다.

$$\zeta = \int_{k_h} \sum_j G(j, k_h) W(j, k_h, z) e^{i(k_h x - \omega(j, k_h) t)} dk_h \quad (4)$$

위에서 $G(j, k_h)$ 는 평균이 0인 복소 가우시안 임의 변수이고 이는 내부파의 에너지 스펙트럼(GM-스펙트럼)을 이용하여 구현된다[3]. GM-스펙트럼은 Garrett과 Munk에 의해 제안된 심해환경에서 실험적인 내부파의 에너지 스펙트럼으로 그 형태는 다음과 같다[2].

이러한 형태는 다음과 같다[2].

$$\langle |G(j, k_h)|^2 \rangle = E_0 H(j) B(j, k_h) \quad (5)$$

여기서 E_0 는 단위면적 당 에너지의 평균값이고 $H(j) = M(j^2 + j_s^2)^{-N/2}$ 로 모드의 영향을 나타내고 $B(j, k_h) = Qk_h^2(k_h^2 + k_j^2)^{-2}$ 로 파수의 영향을 나타낸다.

여기서 k_j 는 $\frac{j\pi\omega_i}{\int_0^{z_D} N(z) dz}$ 이고 M 과 Q 는

$M \sum_{j=1}^{\infty} (j^2 + j_s^2)^{-N/2} = 1, \int_0^{\infty} B(j, k_h) dk = 1$ 이 되도록 결정한다. p 는 스펙트럼을 로그 스케일로 나타냈을 경우의 경사를 말해주고 있고 j_s 는 감쇄를 설명 해주고 있다. 어떤 해역에서 내부파를 설명하기 위해서 이 계수의 수정을 통하여 해양 환경에 맞는 스펙트럼을 구현하여 사용한다. 통상적으로 심해의 경우는 $p=2, j_s=3$ 을 사용하고, 천해의 경우는 $p=3$ 또는 4, $j_s=1$ 을 사용하는 것으로 알려져 있다. 천해의 경우는 심해의 경우와는 다르지만 GM-스펙트럼을 수정하여 내부파를 설명할 수 있다.

III. 내부파와 음속 변화와의 관계

음속의 포텐셜 변화량(C_p)만이 해양에서의 수직 변위와 관계를 갖으므로 따라서 내부파의 수직 변위와 음속의 변화량 δC 는 다음과 같은 식으로 표현된다[3].

$$\frac{\delta C}{C} = (C^{-1} \partial_z C_p) \zeta = FN^2(z) \zeta \quad (6)$$

여기서 F 는 온도와 염도의 변화량에 관계된 값, $N(z)$ 는 부력 주파수, ζ 는 내부파의 수직 변위이다. 식 (6)과 식 (4)를 사용하면 다음과 같이 내부파에 의한 음속의 변화량을 최종적으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\delta C}{C} = RE \left\{ \int_{k_h} \sum_j FN^2(z) G(j, k_h) W(j, k_h, z) e^{i(k_h x - \omega(j, k_h) t)} dk_h \right\} \quad (7)$$

위의 식으로부터 내부파에 의한 음속의 변화량은 내부파의 수직 변위 외에도 부력주파수의 영향을 강하게 받을 수 있다.

IV. 음속 변화의 수치적 모사

특정 해역의 관성 주파수, 경계조건, 내부파의 에너지 스펙트럼 등의 측정 자료들이 주어지면 이로부터 내부파의 지배 방정식을 풀어 고유모드와 내부파의 주파수를 얻고, 가우시안 임의 변수 $G(j, k_h)$ 를 구현하여 내부파의 수직 변위를 얻어 최종적으로 내부파에 의한 음속의 변화량을 구현한다.

내부파의 지배 방정식 (1)을 수치적으로 풀기 위하여 다음의 식으로 변형한다.

$$\frac{d^2 W}{dz^2} + \left[-k_h^2 + (N^2(z) - \omega_i^2) \cdot \frac{k_h^2}{\omega^2 - \omega_i^2} \right] W = 0 \quad (8)$$

위 식을 풀기 위해서 2차의 중앙 차분법을 적용하여 다음과 같은 식을 얻는다.

$$g_j(z) W_{j+1} + (-2 - k_h^2 h^2) g_j(z) W_j + g_j(z) W_{j-1} - \lambda W_j = 0 \quad (9)$$

여기서 h 는 깊이 간격, $g_j(z)$ 는 $\frac{1}{N^2(z) - \omega_i^2}$, λ 는 $-\frac{k_h^2 h^2}{\omega^2 - \omega_i^2}$ 이다. 식 (9)에 경계조건 식 (2)를 적용하여 각각의 고유값과 그에 해당하는 고유함수를 구한다. 내부파의 j 번째 모드의 주파수 ω_j 는 j 번째 고유값 λ_j 로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\omega_j = \sqrt{\omega_i^2 - \frac{k_h^2 h^2}{\lambda_j}} \quad (10)$$

내부파의 주파수는 관성 주파수와 부력 주파수 사이에 존재해야 하므로 식 (10)로부터 수치적으로 구현된 각각의 고유값들 중 음수만이 물리적인 의미를 가지게 되는 것을 확인할 수 있다.

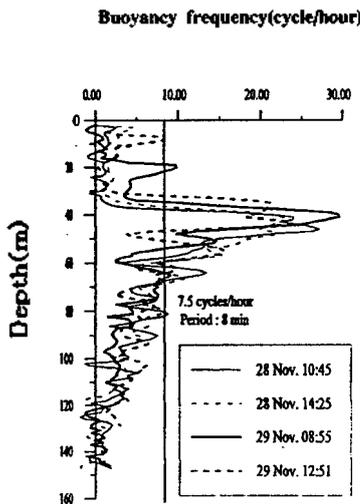


그림 1. 수심에 따른 천해의 부력 주파수
Fig. 1. Depth dependence of buoyancy frequency in shallow water.

내부파의 수직 변위를 구현하는데 결정적인 영향을 주는 부력주파수는 그림 1과 같다. 그림 1에서 확인할 수 있듯이 부력 주파수가 지수함수 형태로 감소하는 심해의

경우와는 달리 천해의 경우는 여러 지점에서 정점을 갖는 것을 볼 수 있다. 이러한 부력주파수는 내부파의 고유함수의 형성에 결정적인 영향을 준다. 내부파의 고유함수들은 저차 모드의 경우 해양의 상층부에서 그리고 고차 모드는 해양의 하층부에서 지배적인 움직임을 갖는다.

앞에서 설명한 내부파의 통계적인 특성을 나타내는 가우시안 임의 변수 G 는 내부파의 에너지 스펙트럼으로부터 구현한다. 내부파의 에너지 스펙트럼은 식 (5)로부터 얻을 수 있고 이 스펙트럼이 주는 값은 가우시안 임의 변수의 분산값이므로 이로부터 Box Muller 공식을 사용하여 구현한다[11].

$$G_i = \sigma \sqrt{-\log X_i} e^{2\pi Y_i} \quad (11)$$

여기서 σ 는 표준 편차 값이고 X_i 와 Y_i 는 0과 1 사이의 균일 분포를 하는 임의의 변수이다.

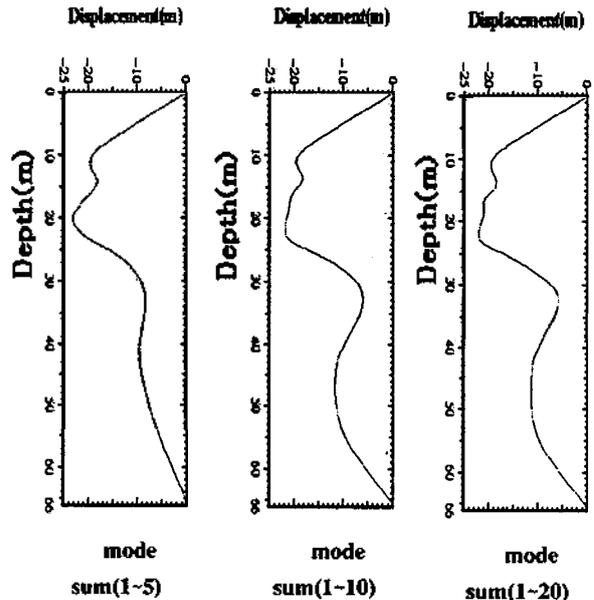


그림 2. 단일 수평 파수에 대한 천해에서 모드 수렴
Fig. 2. Mode converge in shallow water for a single horizontal wavenumber.

천해의 환경에서 내부파의 수직 변위를 식 (4)에 의하여 구하는 과정에서 모드 수렴성을 살펴보기 위하여 단일 파수에 대한 수렴 실험을 실시하였다(그림 2). 심해에서의 내부파는 고차모드의 영향이 포함되어 있어 많은 수의 모드의 합에서 수렴하고 있는 것으로 알려져 있으나[3] 그림 2와 같이 천해에서의 내부파는 저차 모드의 영향이 결정적이고 모드 수 약 10 정도에서 수렴하고 있는 것을 확인할 수 있다. 천해에서 고차 모드의 영향이 사라지는 현상은 해양 깊이의 제한에 의해서 고차모드들이 사라지기 때문이다.

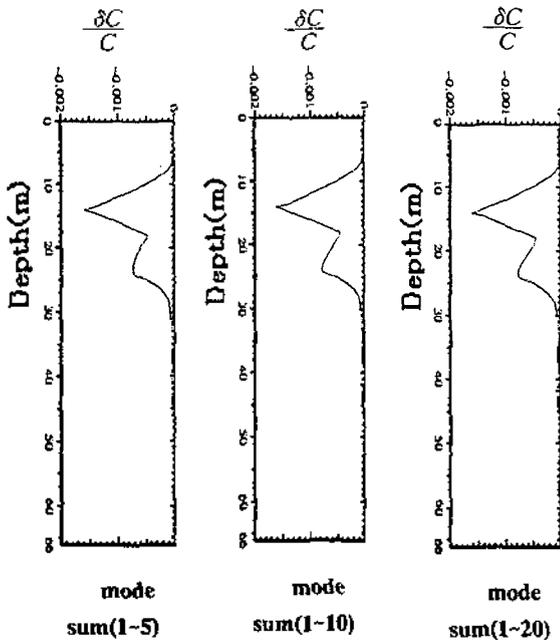


그림 3. 단일 수평 파수에 대한 천해에서 내부파에 의한 깊이 방향으로의 음속의 변화율($\frac{\delta C}{C}$)

Fig. 3. Sound fluctuation rate as a function of depth due to internal waves in shallow water($\frac{\delta C}{C}$) for a single horizontal wavenumber.

그림 3은 천해의 환경에서 내부파에 의한 음속의 변동량을 식 (7)에 의하여 모드 수렴의 관점에서 살펴보기 위해 단일 파수에 대하여 구현해 본 것이다. 심해에서의 내부파에 의한 음속의 변동량은 고차 모드의 영향을 받는 반면 그림 3과 같이 천해에서의 내부파에 의한 음속의 변화량은 저차 모드의 영향이 지배적임을 확인할 수 있다. 또한 천해에서의 내부파에 의한 음속의 변화량은 모드 수 약 10정도에서 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 내부파에 의한 음속의 변동량은 내부파의 수직 변위 외에도 부력 주파수의 영향을 받기 때문에 심해와 마찬가지로 천해 또한 해양 하층부에서 음속 변동량이 매우 작은 것을 확인할 수 있다.

V. 실제 측정 자료와 비교

실제 해양에서의 관성 주파수, 부력주파수, 온도 스펙트럼이 주어지면 이로부터 내부파의 수직 변위를 구현하고 이를 바탕으로 내부파에 의한 음속의 변화량을 구현할 수 있다. 본 장에서는 한국 동해에서의 실험 자료[7]를 바탕으로 내부파에 의한 음속의 변화량을 구현해 보았다. 실제 해상 실험에 대한 구체적인 내용들은 참고문헌 [7]에 기술되어 있다.

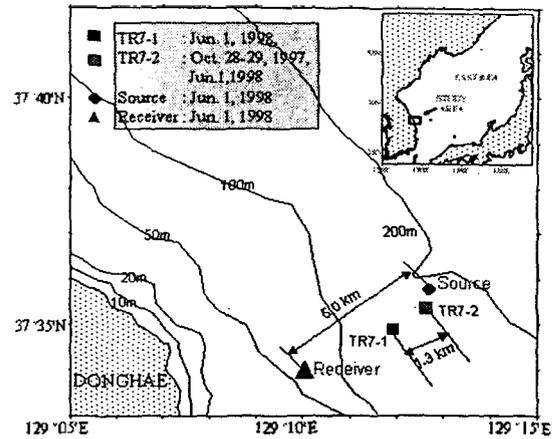


그림 4. 실험 지역
Fig. 4. Station map of oceanographic and acoustic experiments.

그림 4(참고문헌[7]에서 따옴)는 1997년과 1998년에 동해에서 실험이 이루어진 지역이다. 이 실험에서 thermistor chain을 사용해서 10초 간격으로 온도를 측정하였다.

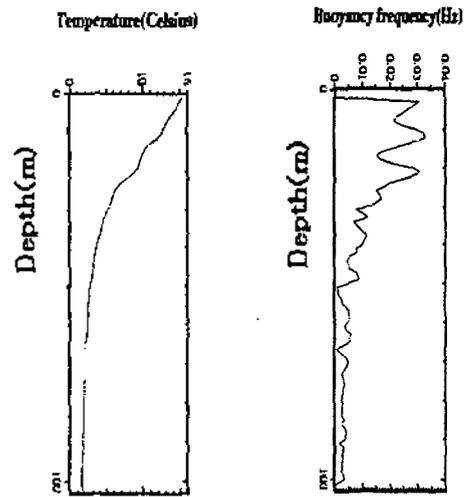


그림 5. 깊이에 따른 온도 분포와 부력주파수
Fig. 5. Depth variation of temperature and buoyancy frequency.

측정 데이터로부터 내부파의 수직 변위를 구현하기 위해 부력주파수를 계산하였다. 그림 5에는 전형적인 깊이에 대한 온도 분포와 이로부터 계산된 깊이에 대한 부력 주파수를 나타내었다. 계산된 부력 주파수는 대부분의 천해 환경에서 존재하는 부력 주파수와 마찬가지로 여러 깊이에서 정점을 가지고 있는 것을 볼 수 있다.

실제 해상 자료로부터 내부파에 의한 음속의 변화량을 알기 위해서는 내부파의 통계적인 특성을 나타내는 에너지 스펙트럼이 필요하다. 본 논문에서는 실제 해상에서 측정한 온도 스펙트럼을 통해서 동해의 환경에 맞는 GM-스펙트럼을 구성하였다.

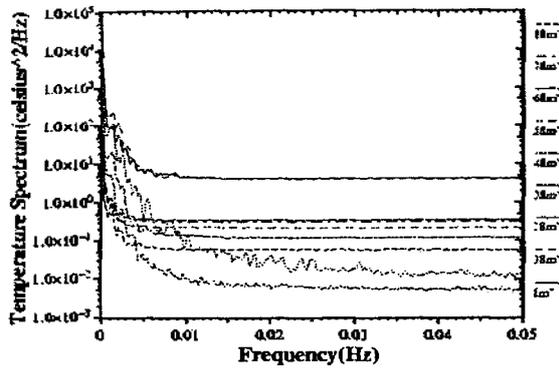


그림 6. 온도 스펙트럼
Fig. 6. Thermal Spectrum

그림 6은 그림 4의 지역에서 깊이 10m간격마다 설치된 온도 센서로부터 매 10초마다 측정된 자료[11]를 사용하여 계산한 온도 스펙트럼이다. 그림 6과 같은 온도 스펙트럼으로부터 내부파의 에너지 스펙트럼을 얻기 위해서 다음의 식을 사용하였다[2].

$$F_T = \left(\frac{dT}{dz} \right)^2 F_\zeta \quad (12)$$

식 (12)는 온도 스펙트럼 F_T 와 변위 스펙트럼 F_ζ 와 의 관계를 나타낸다. 여기서 T 는 온도를 나타낸다. 또한 에너지 스펙트럼과 변위 스펙트럼의 관계에 의해서 온도 스펙트럼과 에너지 스펙트럼의 관계는 다음 식과 같다.

$$E(\omega) = \rho(N^2(z) - \omega_i^2)F_\zeta = \rho(N^2(z) - \omega_i^2) \left(\frac{dT}{dz} \right)^{-2} F_T \quad (13)$$

따라서 식 (13)을 사용하여 측정된 온도스펙트럼(그림 6)으로부터 내부파의 에너지 스펙트럼인 그림 7을 얻는다.

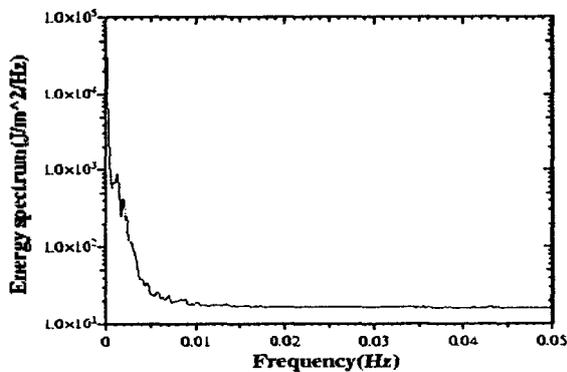


그림 7. 에너지 스펙트럼
Fig. 7. Energy Spectrum of the internal wave derived from the thermal spectrum.

에너지 스펙트럼으로부터 내부파가 존재하는 주파수 범위, 즉 관성주파수와 부력 주파수 사이의 에너지 값을 적분하여 얻은 평균 에너지 값이 438.7803 J/m^2 이며 GM-스펙트럼을 구성하기 위해 결정해야 되는 계수 ρ 와 j 는 각각 3과 1을 사용하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 스펙트럼을 로그 스케일로 나타냈을 경우의 경사를 말해주는 ρ 와 감쇄를 설명 해주는 j 값은 실제 측정 자료를 모델로 분석하여 에너지 스펙트럼을 분석하여 결정하여야 한다. 본 논문에서는 보통 천해의 환경에서 내부파의 저차 모드가 강하게 작용하는 점을 감안하여 j 값을 1을 사용 하였으며 스펙트럼의 기울기를 나타내는 ρ 값은 그림 7에 나타난 스펙트럼으로부터 fitting을 통하여 3으로 결정하였다.

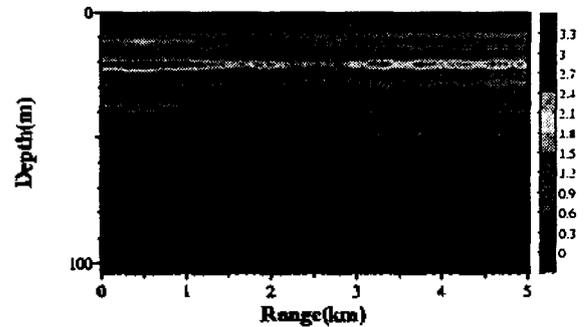


그림 8. 음속의 변동량의 수치적 모사(변동량의 단위는 m/s이다.)
Fig. 8. Simulation of sound fluctuation due to internal waves. Contour levels are represented in m/s.

그림 8은 수치적인 방법에 의해 임의로 구현한 내부파에 의한 음속의 변동량이다. 계산된 음속의 변동량은 대략 $O(1)$ 의 차수(그림 11, 그림 12)를 갖는다. 그러나 실제 해상 실험을 통해 측정된 온도의 변동량으로부터 측정된 음속의 변동량은 최대 22 m/s 이고 평균 12 m/s 정도이다. 이렇게 임의로 구현된 음속의 변동량과 측정된 값이 차이를 보이는 원인은 다음과 같이 생각해 볼 수 있다. 첫째, 실제 해상 실험 자료의 부족으로 적절치 못한 GM-스펙트럼이 구성되었을 가능성을 생각해 볼 수 있고 둘째로는 solitary wave 등 확산 내부파와는 다른 시공간의 크기를 가지는 해양환경을 고려하지 않았기 때문으로 생각해 볼 수 있다.

앞에서 구현된 내부파에 의한 음속의 변동량을 사용하여 음전달 수치 실험을 수행하고 이 결과를 실제 음향 실험 자료[7]와 비교를 해 보았다.

음향 실험은 그림 9(참고문헌[7]에서 따옴)과 같이 주파수 250 Hz 를 가지는 음원이 수심 20 m , 수신기는 음원으로부터 5 km 거리에 위치해 있고 바닥은 오르막 경사를 가지는 환경에서 수행되었다. 음 전달 수치 실험을 위해서 필요한 환경변수는 그림 9에 나타난 값을 사용하였다. 수리 실험을 위해서는 거리종속 다른 구조를 가진 현상을

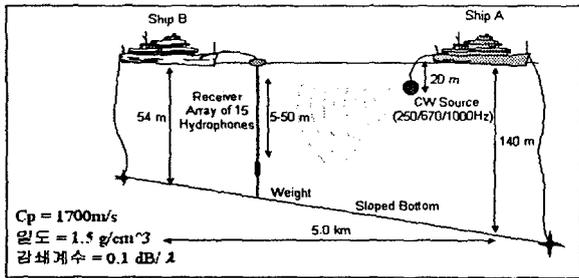


그림 9. 음향 실험 환경
Fig. 9. Schematic picture showing acoustic experiment.

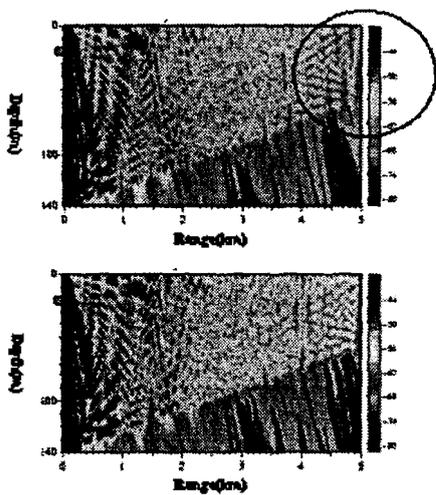


그림 10. 그림 13의 환경에서의 음 전달 손실
(↑: 내부파가 없을 경우, ↓: 내부파가 있을 경우)
Fig. 10. Transmission loss contours for the East Sea experiment.
Contour levels are represented in dB/m.
(Top : without internal waves, Bottom : with internal waves)

파악하는데 적합한 Galerkin 방법을 사용한 교차 포물선 방정식법[8]을 사용하였다.

그림 10은 임의로 구현된 내부파가 존재하지 않을 경우와 존재할 경우의 음 전달 수치 실험 결과로부터 얻은 음 전달 손실량이다. 음 전달 수치 실험 결과 내부파가 없을 경우에는 내부파가 있을 경우보다 음 전달 경로가 분명하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 내부파가 음 전달에 영향을 주는 것을 예측할 수 있지만 내부파가 통계적인 성격을 갖기 때문에 다음과 같은 불규칙 변동계수(scintillation index)를 통해서 음 전달에 대한 내부파의 영향을 파악해 보았다[6]. 불규칙 변동계수는 수중 음의 단위 면적 당 에너지의 표준화된 이차 모멘트(분산)를 나타내고 다음과 같이 정의한다.

$$SI(r, z, f) = \frac{\langle I_i^2(r, z, f) \rangle - \langle I_i(r, z, f) \rangle^2}{\langle I_i(r, z, f) \rangle^2} \quad (14)$$

여기서 r 은 거리, z 는 깊이, f 는 주파수, I_i 는 음압의 i 번째 실현치로써 $I_i(r, z, f)$ 는 $P_i(r, z, f) * P_i^*(r, z, f)$ 로 구한다. $P_i(r, z, f)$ 는 i 번째 구현된 음압이다. 즉 불규칙 변동 계수가 큰 값을 갖는 부분이 음 전달에 대한 내부파의 영향을 강하게 받는 위치라고 판단 할 수 있다.

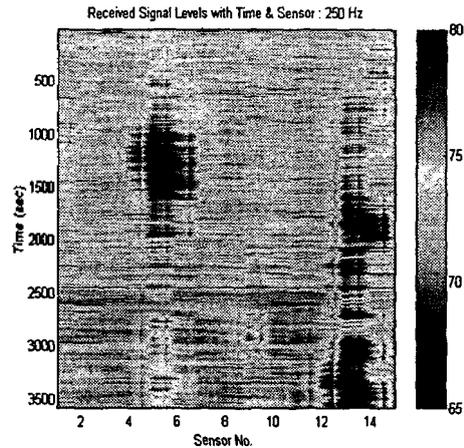


그림 11. 해상 실험 음향 자료
Fig. 11. Received signal levels(dB).

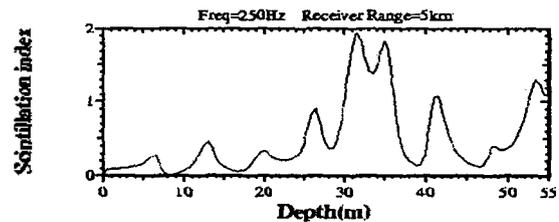


그림 12. 불규칙 변동 계수
Fig. 12. Scintillation index.

그림 11(참고문헌[7]에서 따옴)은 실제 해상 실험을 통해 얻은 시간에 따른 각 수신기에서 측정된 음압의 변동량이다[7]. 그림 12는 총 20번의 수치적으로 구현한 내부파를 고려하여 수행된 수치실험을 통해 얻은 불규칙 변동계수이다. 그림 11로부터 수신기 5번과 13번, 즉 깊이 12m, 36m에 위치한 수신기에서 시간에 따라 매우 큰 음압의 변동을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 그림 12에서 정점을 보이는 지점이 실제 음향 실험자료에서 음압의 변동을 보이는 부분을 포함하고 있는 것을 볼 수 있다. 실제 해상 실험에서 발생할 수 있는 부정확성을 고려하면 불규칙 변동계수 값들이 해상실험 자료들을 비교적 잘 설명하고 있음을 확인할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 수중 음 전달이 이루어지는 해양 환경

에서 관성 주파수, 부력 주파수, 평균적인 속도 분포, 온도 스펙트럼이 주어져 있을 경우 통계적인 방법을 통하여 내부파에 의한 음속의 변동량을 계산하고 이로부터 내부파가 존재할 경우 수치적인 음 전달 실험을 수행할 수 있음을 보였다.

또한 음전달에 대한 내부파의 영향의 상대적인 크기를 나타내는 불규칙 변동 계수와 실제 음향 실험 자료의 비교를 수행하였다. 비교 결과, 임의로 구현한 내부파를 고려한 음 전달 실험 결과와 실제 해상 실험 자료가 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다.

하지만 내부파에 의한 음속의 변동량 값이 실제 해양 온도의 측정을 통해서 얻은 음속의 변동량과 값의 차이를 보이는 것을 볼 수 있었으며, 이의 주요한 원인으로는 실제 해상실험 자료의 부족으로 GM 스펙트럼의 구성이 적절하지 못한 점과 확산 내부파와 다른 시공간의 크기를 가진 해양 움직임을 고려하지 않고 음속의 변동량을 구현하였기 때문으로 생각된다.

실제 해양환경에서의 정확한 수중 음 전달 현상 파악을 위해서는 그 해역에서의 보다 많은 해상 실험을 통해서 해양환경에 대한 정확한 자료를 구축하고 있어야 한다. 한국 동해에는 내부파가 자주 존재하는 것으로 알려져 있으나[12] 해상 실험의 부족으로 내부파의 에너지 스펙트럼(GM-스펙트럼)을 정확하게 구성하지 못하여 정확한 음 전달 현상을 파악하는데 어려움을 겪고 있다. 따라서 한국 근해에서의 정확한 수중 음 전달 현상 파악을 위해서는 충분한 해상실험이 필요하고 확산 내부파와 다른 시공간의 크기를 갖는 해양 움직임에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

후 기

해양 실험 자료를 제공해주시고 부력주파수, 온도 스펙트럼을 계산해 주신, 서울대학교 해양학과 김형록씨와 음향 실험 자료를 제공해 주신 국방과학 연구소 나영남 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, AIP Press, 1994.
2. C. Garrett and W. Munk, "Space-time scale of internal waves," *Geophys. Fluid Dyn.* 2, 225-264, 1972.
3. S.M. Flatte', R. Dashen, W.H. Munk, K.M. Watson, and F. Zachariassen, *Sound transmission through a fluctuating Ocean*, Cambridge, 1979, pp. 3-61.
4. S.M. Flatte' and F.D. Tappert, "Calculation of the effect of internal waves on oceanic sound transmission," *J. Acoust. Soc. Am.* 58, 1151-1159, 1975.
5. John R. Apel et. al, "An overview of the 1995 SWARM shallow-water internal wave acoustic scattering experiment," *IEEE J. Oceanic Eng.* 22, 465-500, 1995.
6. Dirk Tielburger, Steven Finette, and Stephen Wolf,

"Acoustic propagation through an internal wave field on a shallow water waveguide," *J. Acoust. Soc. Am.* 101, 789-808, 1997.

7. Young-Nam Na, Mun-Sub Jung, and Taebo Shim, "Interference of acoustic signals due to internal waves in shallow water," *J. Acoust. Soc. Kor.* 18, 9-20, 1999.
8. 이철원, 성우제, 정문섭, "Galerkin방법을 이용한 고차 포물선 방정식 수중 음 전달 해석," *한국음향학회지* 18(4), 71-77, 1999.
9. O.M. Phillips, *The dynamics of the upper Ocean*, Cambridge University press, 1977, pp. 99-255.
10. John R. Apel, *Principles of ocean physics*, Academic press, 1987.
11. Saul A. Teukolsky, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University press, 1992.
12. K. Kim, J. Y. Na, S. C. Park and W. J. Seong, Annual Report : Underwater Acoustics Modeling Laboratory, Underwater Acoustics Research Center Rep., 1999.

▲ 최 범 호(Byung-Ho Choi)



1994년 3월 ~ 1998년 2월 :
서울대학교 조선해양공학과(공학사)
1998년 3월 ~ 2000년 2월 :
서울대학교 대학원 조선해양공학과
(공학석사)

※ 주 관심분야: 천해에서의 음 전달 현상.
음 전달에 대한 내부파의 영향.

▲ 성 우 제(Woojae Seong)

현재: 서울대학교 조선해양공학과 교수
ACOSTICS Vol. 13 No. 2E 참조

▲ 박 정 수(Joung-Soo Park)

현재: 국방과학연구소 연구원
한국음향학회지 제 16권 6호 참조