한국군사과학기술학회지 제12권 제1호, pp. 37~43, 2009년 2월

학술논문 해상 · 수중 부문

동해 내부파의 물리적 특성과 단주기 오목형 내부파가 음파전달에 미치는 영향

Physical Characteristics of Internal Waves and the Effect of Short Depression Internal Wave on Acoustic Transmission in the East Sea

한 봉 완* 임 세 한** 박 경 주** 김 성 일***
Bong Wan Han Se Han Lim Kyeong Ju Park Seongil Kim

Abstract

Fluctuations in the ocean are closely related with the underwater acoustic propagation. Internal waves are generated by fluctuation of isopycnal layer in the upper part of the stratified ocean, which are propagated from offshore to coastal area. Physical characteristics of the internal waves existed in the East Sea were derived from the five field experimental data and the ocean monitoring buoy nearshore the mid-east coast of Korea. The dominant periods are appeared in the near-inertial period about 17~20hours and the short period about a few minutes. The wavelengths of them are 10~50km and 300~1000m, and the phase speeds are 20~100cm/s and 30~70cm/s, respectively. The maximum amplitudes are about 20~25m. Under the environment of short depression internal wave propagation, the variations of transmission loss field were investigated using an range-dependent acoustic transmisson loss model(RAM). The result shows that the large irregular variations of transmission loss caused by progressing the internal wave from offshore toward coast.

Keywords : Internal Wave(내부파), Acoustic Transmission Loss(음파 전달손실)

1. 서 론

성층화된 해양에서는 부력주파수에서부터 관성주파수에 이르기까지 다양한 내부파가 존재한다[1]. 성층화된 해양내부에 존재하는 내부파는 전 세계 여러 바다에서 그 존재가 알려져 있으며 내부파에 의한 작은 규모의 시공간적인 해양환경변화는 수중음파전달에 큰 영향을 줄 수 있다[5]. 동해는 영구 수온약층과 계절 수온약층이 잘 발달되어있어 관성주파수 부근에서 내부조석이나 준관성주기 진동이 탁월하게 나타나며 해저지형과의 상호작용에 의해 부력주파수 부근의 단주기 내부파가 생성되는 것으로 알려져 있다[2]. Kim 등(2001)[3]은 1999년 5월에 동해시 연안역에서 최대 수직 진폭이 25m에 달하는 단주기 내부파를 관측하고

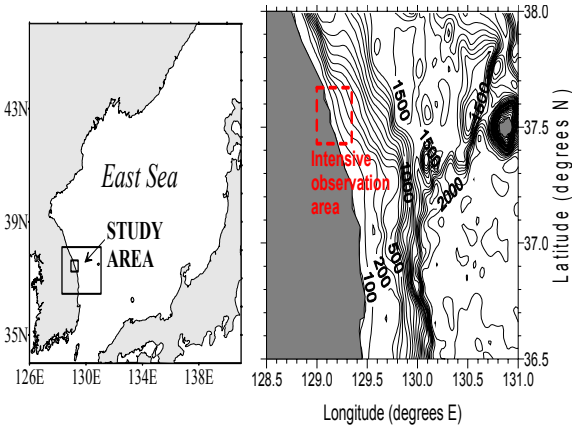
† 2008년 10월 6일 접수~2009년 1월 9일 게재승인
* 해군작전사
** 해군사관학교
*** 국방과학연구소(ADD)
책임저자 : 임세한(satzmo@gmail.com)

이를 이차 비선형성을 고려한 combined KdV(Koteweg-de Vries) 방정식[4]을 이용하여 물리적인 특성을 설명하였다. 또한 단주기 내부파의 생성과 관련하여 동해 연안에 빈번하게 나타나는 강한 준관성주기 진동과 대륙붕단 부근 해저지형과의 상호작용을 제안하였다. 최근에는 동해 연안역의 대륙사면에서도 단주기 내부파가 관측되어 계절에 따라 변화하는 해양의 성층화 정도가 단주기 내부파의 성격에 큰 영향을 주며, 연안에 근접하게 되면 해저지형 효과로 인한 굴절, 분열, 천수변형이나 쇄파가 발생할 수 있음이 밝혀졌다[5]. 천해에서 비등방성 내부파로 인한 3차원 모델 수행결과[6]에 의하면 전달손실 및 수평 굴절 등에 변화를 주어 수신기에 영향을 미치고, 음원과 수신기간 방위를 변화시켜 수평 어레이 빔형성에 영향을 끼치게 된다. 또, 내부파의 위치에 따라 단거리에 음파의 집중 및 분산현상이 나타나는 원인으로 작용하기도 한다[7]. 본 논문에서는 동해항 부근 연안해역에서 실시한 해상실험과 동해 실시간 해양모니터링 부이 시스템을 통해 수집된 해양자료(수온, 유속)를 분석하여 내부파의 물리적 특성들을 규명하여 정리하였다. 또한 단주기 오목형 내부파가 존재하는 음향환경을 가정하여 거리종속 음파전달 손실 계산에 적합한 음파 전달 손실 계산 수치모델인 RAM(Range-dependent Acoustic Model)[8]을 이용, 내부파에 의한 음파전달 영향을 정량적으로 분석하였다

2. 동해 연안해역 내부파의 물리적 특성

동해시 연안해역에서 실시된 해상실험(그림 1)을 통해 내부파의 특성을 파악해 보았다.

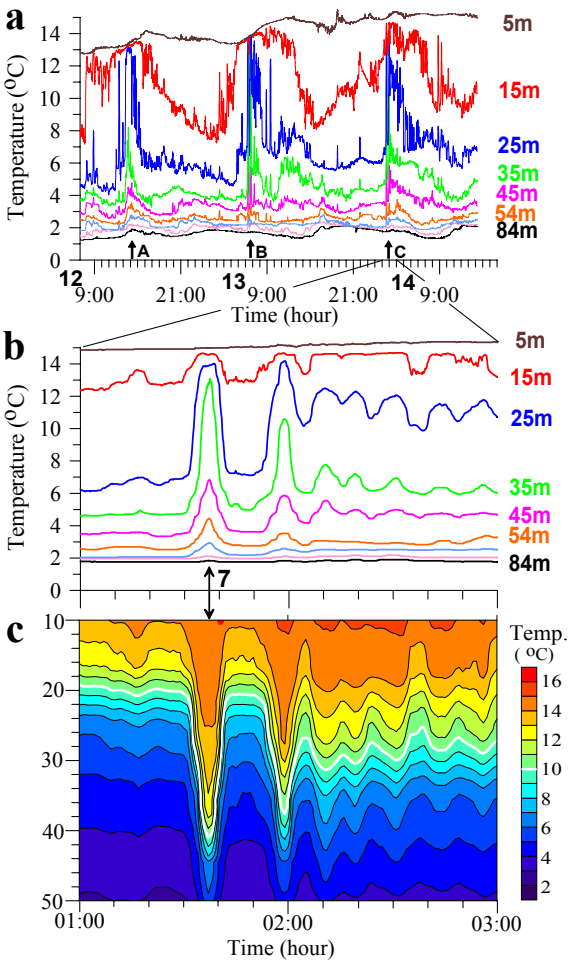
동해시 연안해역에서 내부파의 물리적 특성을 조사하기 위해 1999년 이후 다섯 차례(1999, 2000, 2001, 2003, 2004년)의 해상실험을 수행하였다. 각 해상실험에서는 정확한 단주기 내부파의 관측을 위해 실시간으로 수심별 수온자료를 획득할 수 있는 서미스터 체인(thermistor chain)을 사용, 수온 변동 자료를 10초 간격으로 수집하였다. 또한 동해 실시간 해양모니터링 부이를 이용하여 1분 간격으로 해양(수온, 해류) 및 기상(풍향, 풍속) 자료를 수집하였으며 실험 기간 동안 CTD 관측으로 당 해역의 수온 및 염분구조를 얻을 수 있었다. 각 해상 실험 시에 나타난 결과 중 가장 빈번하게 발생하는 현상을 중심으로 당 해역에서



[그림 1] 동해 연안해역의 내부파 해상실험구역

내부파의 물리적 특성을 분석하였다.

그림 2는 1999년 5월 12일에서 14일 사이에 서미스터 체인(thermistor chain)으로 관측한 수심별 수온의 시간 변화를 나타내고 있다. 내부파 다발로 보이는 매우 심한 수온의 변동이 수심 15~45m에서 3회 관측되었다(그림 2(a)). 각 수온 변동에서 약 19시간 주기를 가지는 준관성주기 내부파를 식별할 수 있다. 각 내부파 다발 내에서 최대 8℃ 수온변화가 수심 25m에서 나타났으며 이러한 수온변동은 전 수층에서 같은 위상으로 나타났다. 그림 2(b)는 5월 14일 오전 1시부터 오전 3시까지 2시간동안의 수온변동을 확대한 것이다. 전층에서 수온이 일정하게 유지되다가 수심 25m 수층의 수온이 7℃에서 14℃로 급격하게 상승한다. 15~54 m 수층의 수온도 약 2~6℃ 정도 상승하며 약 10분 후에 원래의 수온으로 하강한다. 두 번째 나타난 수온변화의 시간간격은 약 20분 정도의 단주기이며 그 이후 수온변화는 점차 작아지고 시간간격도 줄어든다. 그림 2(c)는 각 수심에서의 수온 변동자료를 등수온선의 수심 변동 자료로 분석한 것이다. 10℃ 등수온선의 수심이 21m에서 42m까지로 급격하게 깊어졌다가 회복되는 것을 볼 수 있다. 또한 전체 등수온선의 변동에서 단주기 오목형 내부파가 다발로 전파되는 전형적인 모습을 확인 할 수 있다. 이러한 등수온선 변동 자료를 토대로 최대 변동폭을 진폭으로 하고, 등수온선의 변동이 시작된 시간부터 끝난 시간까지의 간격을 주기로 하여 내부파의 진폭과 주기를 계산할 수 있다. 수차례의 해상실험을 통해 나타난 동해 연안역에서의 내부파는 주기별로 크게 준관성주기 내부파와 단주기 내부파로 구분할 수 있다. 준관성주기 내부파



[그림 2] (a) 서미스터 체인에서 관측된 수온 시계열 자료. 수심 25~35m에서 19시간 간격으로 급격한 수온변동이 보임. (b) 5월 14일 01:00 시부터 03:00시까지 2시간의 수온 시계열 자료. (c) b에 대한 등수온선 시계열 자료

는 파장 10~50km, 위상속도 20~100cm/s, 주기 17~20시간 정도이다. 단주기 내부파는 파장 300~1000m, 위상속도 30~70cm/s, 주기 수분~수십분이며 최대 진폭은 준관성 및 단주기에서 20~25m로 관측되었다.

3. 내부파에 의한 음파전달 영향

가. 내부파가 존재하는 음파전달 환경설정

동해에서 조사된 내부파의 물리적 특성을 근거로가장 빈번하게 발생하는 단주기 오목형 내부파를 혼합된 KdV(combined KdV) 방정식[4]을 이용하여 모의하고, 거리종속 음 전달모델인 RAM을 이용하여 음파전달 영향을 살펴보았다. 단주기 오목형 내부파의 물리적 특성은 이동속도 70cm/sec, 파장 400m, 진폭 20~25m, 진행방향을 외해에서 내해로 각각 가정하였다. 내부파 실험을 위한 음장은 내부파 부재시의 선형 음속구조를 기준으로 삼아 10km까지의 음장이 균일하다고 가정하고 내부파 진행에 따른 음장의 변화를 재구성하였다. 실험 목적상 내부파의 영향만을 고려하기 위해 해저면은 평탄(전 구간 수심 200m)하게, 저질은 뻘(mud)로 균질하다고 하였다. 음원은 추진기 소음을 모사하기 위해 수심 10m, 음원 주파수 200Hz, 내해에 위치하고 수신기는 외해에 위치하는 것으로 하였다. 따라서 오목형 단주기 내부파 부재시와 존재시에 따른 음파전달 손실의 영향을 보다 세밀하게 살펴볼 수 있었다. 준관성주기 내부파는 오목형 단주기 내부파보다 발생빈도가 낮고, 주기 및 파장이 길며(17~20시간, 10~50km) 음파 전달손실 계산시 음원주파수(200 Hz)를 고려했을 때 단주기 내부파보다는 음파전달에 영향을 적게 줄 것으로 판단하여 금번 실험에서는 제외하였으며 차후 연구과제로 실시할 예정이다.

나. Kdv equation

파장이 해저 수심에 비하여 매우 큰 경우 그리고 파고가 해저수심에 비해 매우 작은 경우에 x 방향으로의 Koteweg-de Vries 방정식[4]은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c\frac{\partial \eta}{\partial x} + \alpha\eta\frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0 \tag{1}$$

여기서 η는 두 경계의 수직적인 변위이다. 이층 유체인 경우, 즉 0 > z > -h1에서 $\rho = \rho_1$인 경우에 식 (Ⅱ.1.1.1)의 계수는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$c = \sqrt{\frac{g(\rho_2 - \rho_1)h_1 h_2}{\rho_2 h_1 + \rho_1 h_2}} \approx \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\rho}\frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2}} \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{3c}{2h_1 h_2}\frac{\rho_2 h_1^2 - \rho_1 h_2^2}{\rho_2 h_1 + \rho_1 h_2} \approx \frac{3c(h_1 - h_2)}{2h_1 h_2} \tag{3}$$

$$\beta = \frac{ch_1 h_2}{6}\frac{\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2}{\rho_2 h_1 + \rho_1 h_2} \approx \frac{ch_1 h_2}{6} \tag{4}$$

여기서 $h_2 = \mathrm{H} - h_1$는 아래층의 두께이고, $\Delta\rho = \rho_1\rho_2$는 두 층의 밀도 차이이다. 오른쪽의 근사는 해양에서 두 층간의 밀도 차이가 아주 작은 경우에 관한 것이다. 이 (1) 식의 이해는 비 선형항인 $(\alpha\eta\eta_x)$과 분산항인$(\beta\eta_{xxx})$의 관계에 있다. 어떤 조건하에서는 이 두 항이 서로 균형을 이루게 되고 이 결과 solitary파라고 불리는 해가 다음과 같이 존재한다.

$$\eta(x,t) = -\eta_0 \sec h^2\left[\frac{x - V_1 t}{L_1}\right] \tag{5}$$

여기서 V_1은 비선형 속도(nonlinear velocity), L_1은 특성 너비(characteristic width)이고 선형속도 c와 최대 변위 η_0에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$V_1 = c - \frac{\alpha\eta_0}{3} \quad , \quad L_1 = \sqrt{-\frac{12\beta}{\alpha\eta_0}} \tag{6}$$

$h_2 > h_1$인 경우 solitary 내부파는 아랫 방향으로 변위가 있다는 것을 식 (5)의 η_0 앞에 음의 부호가 있음으로 알 수 있다. $\rho_1 h_2^2 > \rho_2 h_1^2$인 경우에 solitary 내부파는 아랫방향으로 변위가 있으며 반대인 경우에는 위쪽으로 변위가 나타남을 앞에서 확인하였다. 그럼 $\rho_1 h_2^2 \sim \rho_2 h_1^2$인 경우에는 보다 고차의 비선형항을 고려해야 하는데 이는 Combined Korteweg-de Vries 방정식[9]으로 풀 수 있다.

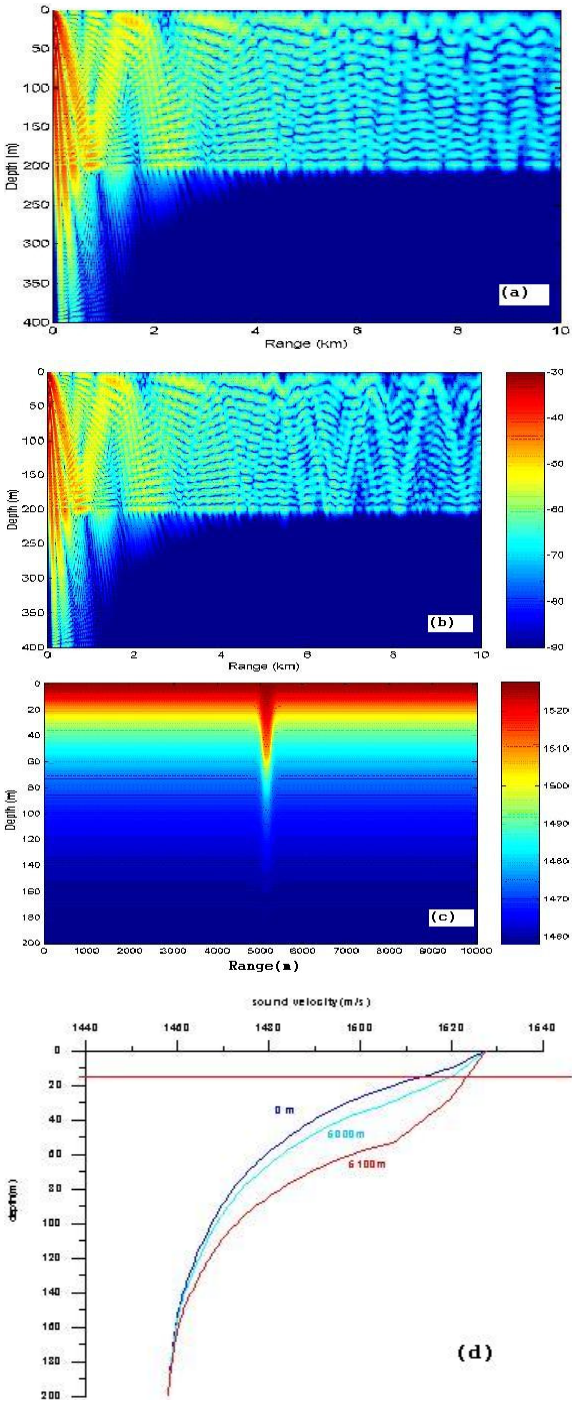
$$\eta(x,t) = -\frac{\alpha}{\alpha_1}\frac{\nu}{2}\left[\tanh\left(\frac{x - V_2 t}{L_2} + \delta\right) - \tanh\left(\frac{x - V_2 t}{L_2} - \delta\right)\right] \tag{7}$$

여기서 비선형 속도(nonlinear velocity) V_2와, 특성 너비(characteristic width) L_2는 다음과 같이 결정된다.

$$V_2 = c - \frac{\alpha^2\nu^2}{6\alpha_1} \quad , \quad L_2 = \sqrt{-\frac{24\alpha_1\beta}{\alpha^2\nu^2}} \tag{8}$$

다. 내부파 존재시 음파 전달손실 영향

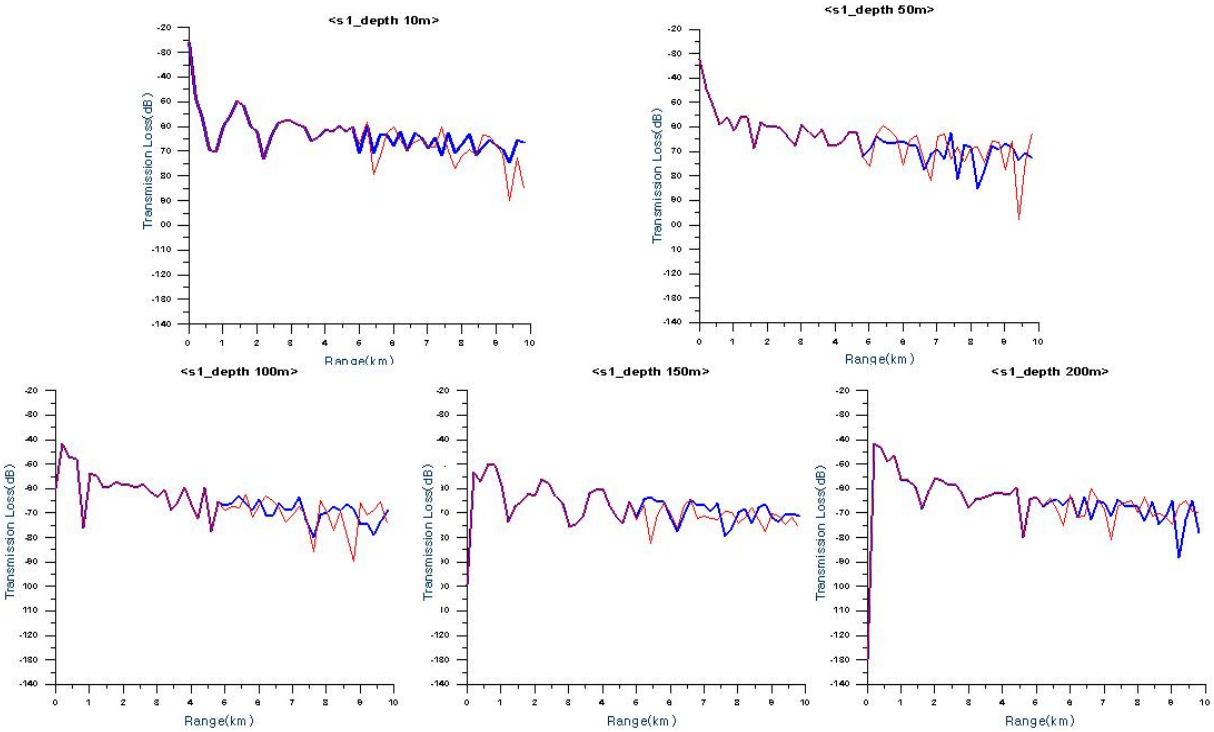
단주기 오목형 내부파가 있을시 전달손실의 변동성을 살펴보기 위해 그림 3(a)는 내부파가 없을시 전달손실 단면도를, 그림 3(b)와 3(c)는 오목형 내부파가 존재시 전달손실과 음속 수직단면도를 각각 나타낸



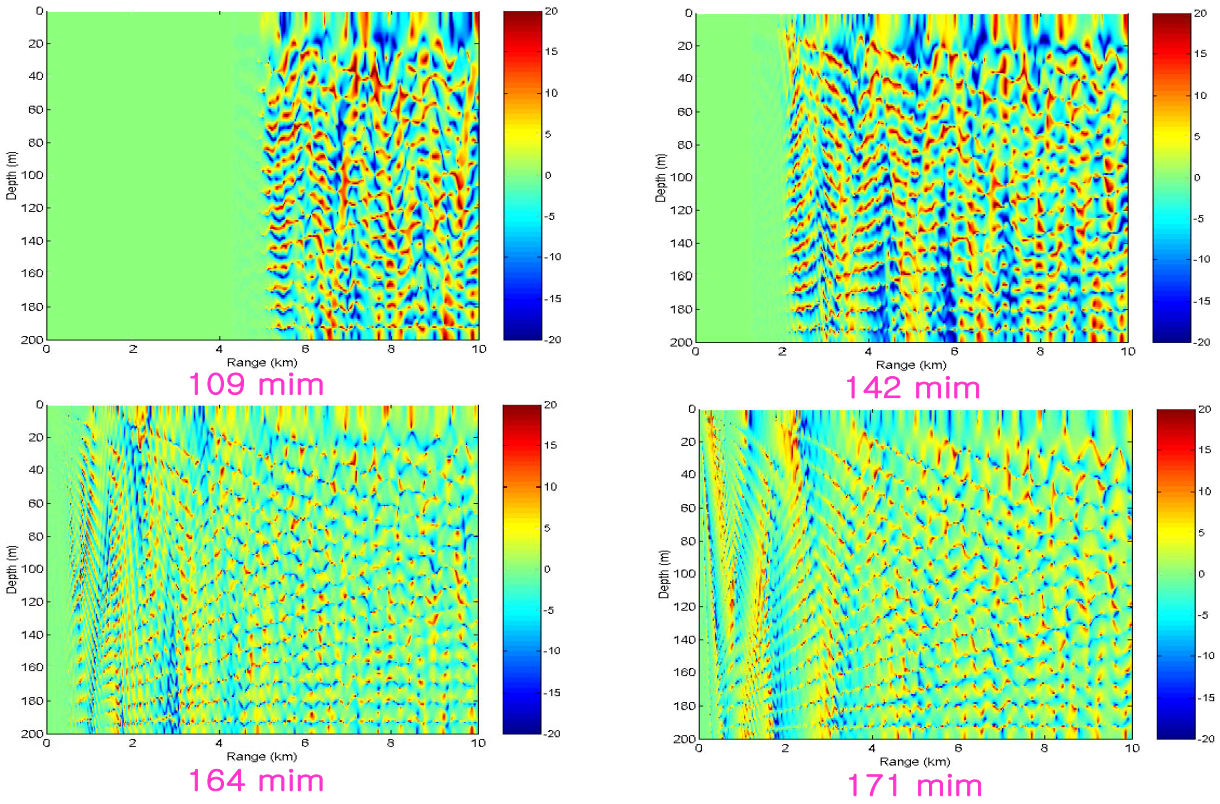
[그림 3] (a) 내부파가 없을시 전달손실 단면도, (b) 오목형 내부파가 존재시 전달손실 단면도, (c) 오목형 내부파 존재시 음속 수평수직 단면도, (d) 거리별 음속 수직구조

것으로. 전달손실값은 음에너지의 전달양상을 알 수 있다. 음속 수직단면도상 단주기 오목형 내부파는 음원으로부터 약 6km 거리의 표층으로부터 수심 150m까지 존재한다. 그림 3(a)와 3(b)를 비교해 보면 내부파의 존재 유무에 따라 전달손실 패턴의 뚜렷한 차이를 볼 수 있다. 즉 내부파 존재구역 이전의 전달손실값은 동일하나 내부파가 존재하는 구역에서는 전달손실 값이 일시적으로 증가(약 5~10dB)한다. 또한 내부파 존재구역 이후의 음 전달양상은 거리 및 수심에 따라 바닥에서 반사된 음에너지가 표층에서 수렴되는 형태(그림 3(b))로 나타나고 있으나 내부파가 없을 시는 표층에서 바닥까지의 전 수층에서 음 에너지 전달이 양호하게 이루어지고 있다. 이는 내부파 존재시 수직적인 음속구조의 변동이 생겨 음파가 하향굴절하게 됨을 의미하는데 그림 3(d)의 거리별 음속 수직구조를 보면 오목형 내부파가 있는 거리에 근접시 음속이 수온약층 부근에서 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 음속의 부음속 경사가 더욱 커지게 되어 음파의 하향굴절이 심화되고 결국 바닥에서 반사되어 진 음 에너지가 표층부근에서 수렴되는 효과가 일부 나타나는 것으로 사료된다. 또한 음 수렴구역이 나타나게 되면 수렴구역에서의 음 전달손실에 비해 비 수렴구역에서의 전달손실이 10dB이상 크게 나타나는 구역이 내부파 부재시에 비해 약 20% 이상 증가하고 있다.

그림 4는 그림 3(a)와 3(b)의 전달손실 값을 각 수심별(10m, 50m, 100m, 150m, 200m)로 구분하여 나타낸 것으로 내부파 존재시와 부재시 전달손실값의 차이를 알 수 있다. 또한 오목형 단주기 내부파가 외해에서 음원이 존재하는 연안으로 전파될 때 이동시간에 따라 변화하는 음장을 재구성하여 전달손실을 계산하고, 내부파가 부재시를 바탕으로 계산된 전달손실값과의 차이를 비교하였다(표 1, 그림 5). 오목형 내부파가 음원으로부터 약 6km에 있고 각 수심별 전달손실의 값도 내부파 존재 지점에서 부터 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 내부파가 존재하는 수심 50m, 100m, 150m는 최대 약 27dB 이상의 차이로 변동이 심하다. 내부파 부재시에는 수심별 전달손실의 거리에 따른 변동폭이 약 10~20dB 이내인 반면 내부파 존재시 일부 구간에서는 음 전달손실값이 내부파 부재시보다 적게 나타나고 일부 구간에서는 크게 나타나는데 변



[그림 4] 오목형 단주기 내부파가 거리 6km에 존재시(적색)와 내부파 부재시 각 수심별 전달손실값 비교



[그림 5] 오목형 내부파의 이동시간별 전달손실값과 내부파 부재시 전달손실값(dB)과의 차이

[표 1] 내부파 이동시간별 도달위치

구 분	위상속도 70cm/s, 외해→내해			
도달시간(분)	109	142	164	171
도달위치(km)	4.58	5.96	6.89	7.18

동폭이 약 10~35dB로 증가함을 볼 수 있다. 이는 내부파 존재시 음 수렴의 효과로 인해 전달손실값의 공간적인 변동이 커졌기 때문이다. 위상속도를 고려한 내부파의 존재위치는 연안으로부터 약 5.5km, 4km, 3 km, 음원근접이다. 내부파의 진행에 따라 진행방향 전방 일부분과 후방에서 음장의 분산과 집중 현상이 약 2km 간격으로 보이고 있다.

주목할 만한 사실은 내부파가 음원방향으로 근접해 갈수록 전달손실값의 차이가 작아지며(20dB이상에서 10dB이내), 음장 패턴의 집중과 분산의 정도가 약해진다는 것이다. 이것은 전달손실값 계산시 음장의 구조가 내부파 존재구역에서만 변형되고 이전/이후에는 안정화된다는 가정을 전제로 실험하였기 때문이며, 집중과 분산의 효과에 대한 분석은 금번 실험에 사용된 RAM의 특성 등을 고려한 보다 다양한 조건하에서 실험한 결과와 실제 해양에서 관측한 음향실험결과를 토대로 한 추가연구가 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 동해에서 관측되었던 내부파의 물리적 특성을 가지고 이를 토대로 음향모델을 이용하여 내부파가 수중 음파 전달양상에 미치는 영향을 연구하였다. 내부파의 물리적 특성으로 준관성주기 내부파의 수평파장은 10~50km, 수평위상 속도는 20~70 cm/s로 나타났고 단주기 내부파는 외해에서 내해로 약 20~70cm/s의 위상속도로 전파하고 진폭이 최대 20m에 이르는 내부파가 관측되었다. 분석결과 동해

연안역에서는 준관성 주기 내부파보다 오목형 단주기 내부파가 빈번하게 나타났다. 오목형 단주기 내부파를 모의하여 음파 전달손실값 변동을 분석해 본 결과 음파 전달 경로에 있어서 수직 음속구조 및 내부파의 시간에 따른 위치에 따라 음파가 수렴되는 집중효과와 퍼지는 확산효과를 확인하였다. 오목형 단주기 내부파의 부재시와 존재시에 따른 전달손실값의 차이는 일정거리(약 2km) 간격으로 최대 ±20dB까지 나타났다. 또한 전달손실의 변동폭이 수심에 따라 상당한 차이를 보이는데 이는 내부파에 의한 음장의 변동이 수심에 따라 다르게 나타나기 때문이다. 향후 다양한 형태별 단주기 내부파 환경 및 준관성 주기 내부파 환경 하에서의 음파전달 양상 분석에 대한 연구를 실시할 예정이다.

Reference

[1] Kundu and Cohen, “Fluid Mechanics 2nd Edn”, pp. 598～608, 2000.

[2] Lie, H.-J., “Near-inertial Current Oscillations Off the Mid-east Coast of Korea”, Prog. in Oceanogr. 21 (3-4), 241～253, 1988.

[3] Kim, H. R., S. Ahn and K. Kim, “Observations of Highly Nonlinear Internal Solitons Generated by Near-intertial Internal Waves Off the East Coast of Korea”, Geophys. Res. Lett. 28(16) : 3191～3194, 2001.

[4] Dodd, R. K., J. C. Eilbeck, J. D. Gibbon and H. C. Morris, “Solitons and Nonlinear Wave Equations”, Academic Press, Ltd., London, 630 pp, 1982.

[5] Kim, Y. H., S. H. Nam, S. J. Lyu, K. Kim, Y. G. Kim and T. B. Shim, “2002～2003 Observation on the Short-period Internal Waves Near and Off the Donghae City”, Korea 18th Underwater Acoustics Symposium Proceedings. 2003.

[6] R. Oba and S. Finette, “Acoustic Propagation Through Anisotropic Internal Wave Fields : Transmissionloss, Crossrange, Coherence and Horizontal Refraction”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 111, pp. 769～784, 2002.

[7] Rodriguez, O. C., S. M. Jesus, Y. Stephan, X. Demoulin, M. B. Porter and E. F. Coelho, “Dynamics of Acoustic Propagation Through a Soliton Wave Packet : Observations from the Intimate “96 Experiment”, Experimental Acoustic Inversion Methods for Exploration of the Shallow Water Environment, pp. 1～18, 2000.

[8] Collins, M. D., “A Split-step Pade Solution for Parabolic Equation Method”, J. Acoust. Soc. Am., 93, pp. 1736～1742, 1993.

[9] Lee, Ch.-Y. and R. C. Bearsley, “The Generation of Long Nonlinear Internal Waves in a Weakly Stratified Shear Flows”, J. Geophys. Res. 79(3), pp. 453～457, 1974.