

동해 내부파의 물리적 특성과 음파전달에의 영향

한봉원*, 남성현*, 윤재열*, 김 구*, 김성일**, 김영규**
*서울대학교 지구환경과학부, **국방과학연구소

Physical characteristics of internal waves and its influence on acoustic propagation in the East Sea

Bong Wan Han*, Sung Hyun Nam*, Jae Yul Yun*, Kuh Kim*, Seongil Kim**, Young-Gyu Kim**
*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University,
**Agency for Defense Development
hans2@ocean.snu.ac.kr

요약

한국 동해시 연안역에서 2001년 6월, 2003년 5월 및 2004년 5월 해상실험 및 실시간 모니터링 부이 시스템을 통해 수집된 해양관측(수온, 유속)자료와 SAR(Synthetic Aperture Radar) 위성영상을 분석한 내부파의 물리적 특성을 정리하였다. 이를 토대로 음파전달 모델(RAM)을 통해 내부파에 의한 음파전달 영향을 파악하고, 음도파관 불변 이론(Waveguide invariant theory)을 적용하여 내부파에 의한 해양 변동성을 음향학적으로 정량화 하였다.

1. 서론

성층화된 해양에서는 부력주파수에서부터 관성주파수에 이르기까지 다양한 내부파가 존재한다. 영구수온약층과 계절수온약층이 잘 발달하는 동해에는 관성주파수 부근에서 준관성주기 진동(Lie, 1988)이 탁월하게 나타나는 것으로 알려져 있다. 또한 이 해역에서는 해저지형과의 상호작용에 의해 부력주파수 부근의 단주기 내부파를 생성할 수 있다. 특히 1999년 5월에 동해시 연안역에서 관측된 단주기 내부파는 최대 수직 진폭이 25m에 달하고 강한 오목형의 비선형 솔리톤 특성을 보여, 2차 비선형성을 고려한 combined KdV (Korteweg de Vries) 방정식으로 그 형태가 설명된 바 있다(Kim et al., 2001). 따라서 동해에서 관측된 내부파의 주기는 크게 1) 준관성주기(near-inertial period, 17-20시간), 2) 단주기(short period, 수 분-수십 분)의 두 가지로 구분된다.

이러한 내부파의 전파는 수중 음 전달 특성에도 다양

한 영향을 미치는 것으로 보인다. 실시간 해양관측부이(ESROB; East Sea Real-time Ocean Buoy)에서 수집된 자료를 보면 여름철에 오목형 솔리톤이 주로 나타나고 겨울철과 대륙붕 내해쪽에서는 종종 블록형 솔리톤이 관측되었다(Kim et al., 2003).

본 연구에서는 동해에서 조사된 내부파의 물리적 특성을 근거로 실측과 유사하게 생성된 오목형 및 블록형의 솔리톤 내부파를 사용하여 여러 번의 수치실험을 통하여 수중 음파전달 영향을 파악하고자 하였다. 솔리톤 내부파에 의해 음속의 변화가 시공간적으로 일어나기 때문에 거리종속 음 전달모델인 RAM (Range-dependent Acoustic Model) 모델(Collins, 1993)을 이용하여 내부파에 의한 음장의 변화를 살펴 보았다. 서로 다른 음파 모드 사이의 간섭 현상은 전달손실(혹은 음압)의 거리-주파수 영역에 간섭패턴을 만들게 되는 데, 내부파로 인한 음파전달 환경의 변동에 따라 특징적인 간섭패턴을 만들게 되며 거리-주파수 영역에서 서로 다른 기울기로 나타나게 된다(G.L.D'Spain et al., 1999 ; D.Rouseff, 2001). 음도파관 불변이론(Waveguide invariant theory)을 적용하면, 이러한 서로 다른 기울기를 군속도와 위상속도의 비로 설명할 수 있는데, 내부파가 존재하게 되면 그 해양환경의 변화로 인해 군속도와 위상속도 사이의 비가 달라진다(Brekhovskikh and Lysanov, 1991). 따라서 간섭패턴의 기울기가 달라져 내부파로 인한 해양환경 변화를 음향학적으로 정량화 할 수 있다.

2. 동해시 연안해역 내부파의 물리적 특성

1999년에 동해시 부근 해상(수심 100m)에 설치된 실시

간 해양 모니터링 부이에서 4-6월 동안 측정된 자료를 분석하여 Kim (2000)은 준관성주기 내부파의 수평, 수직 파장과 위상속도 및 군속도를 추정하여 개략적 특징을 밝힌 바 있다. 또, Kim et al.(2001)은 1999년 5월에 관측된 비선형 단주기 내부파의 생성원인으로 이러한 준관성주기 내부파와 해저지형의 상호작용을 제안하였다. 모니터링 부이에서 2003년에 단주기 내부파 관측을 위해 1분마다 측정된 수온 자료들을 확인해 보면 수온 약층의 깊이가 2월에 최대가 되어 50m 부근에 위치했으며, 계절수온약층이 발달하는 6-8월에는 그 깊이가 얕아져 15-20m 수심에 이르렀다(Nam et al., 2003).

실시간 모니터링 부이를 이용한 내부파 관측 외에도 동해시 연안해역에서 세 차례(2001, 2003, 2004년)의 해상실험을 수행하여 내부파의 물리적 특성을 파악하였다(Nam et al., 2004). 1999년에 관측된 내부파와 같이 비선형 특징을 보였고, 외해에서 내해로 약 20-70 cm/s의 위상속도로 전파하였다. 해상실험 시의 부력환경에 따라 단주기 내부파의 특성이 크게 달라지나, 수온약층이 약 20 m 수심에 위치하고 진폭이 최대 20 m에 이르는 오목형의 단주기 내부파가 자주 관측되었다.

인공위성 SAR (Synthetic Aperture Radar) 영상을 분석하면 단주기 내부파의 공간적인 분포특성을 파악할 수 있다. 최근 SAR영상을 분석하여 동해에 나타나는 단주기 내부파의 공간적 특성을 정리한 결과에 의하면, 비선형 단주기 내부파의 수평 파장은 50-400 m, 패킷내의 내부파 사이 거리는 140-2600 m, 패킷과 패킷 사이의 간격은 45-67 km로 나타났다(Kim et al., 2004).

3. 내부파에 의한 음파전달 영향

3.1 내부파가 존재하는 음파전달 환경설정

RAM모델을 수행한 영역에서 수심은 전 구간 모두 200m로 고정하였으며 해저면은 평탄하게 설정하였다. 이때 단주기 내부파 혹은 준관성주기 내부파가 외해에서 연안으로 전파해오는 환경을 설정하고, 연안쪽에 위치한 음원의 수심을 10m, 음원 주파수를 200Hz로 하였을 때의 전달손실을 계산하여 음파전달 영향을 비교하였다. 단주기 및 준관성주기 내부파의 형태는 오목형과 볼록형인 경우에 대해 각각 계산하였다.

3.2 음향모델 결과

단주기 내부파는 그 형태가 오목형인 경우에 볼록형인

경우보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 두 경우 모두 음속의 수평기울기가 큰 100 m 이내 수심에서 전달손실이 크게 발생했고 일정거리(약 2 km)간격으로 전달손실이 커지거나 작아지는 현상이 반복되었다. 또한 20-25m 진폭의 단주기 내부파에 의해 ± 20 dB의 전달손실 차이가 발생할 수 있음을 확인하였다(Nam et al., 2004).

준관성주기 내부파가 존재할 경우에는 약 ± 10 dB 범위의 전달손실이 나타나지만, 거리마다 차이가 뚜렷하였으며 특히 거리가 멀수록 변동 영향이 더 크게 나타내었다(그림 1a). 준관성주기 내부파로 인한 음장의 분산과 집중현상을 고려하여, 내부파가 있는 경우의 전달손실 값에서 없는 경우의 전달손실 값을 뺀 차이에 대한 분포를 양(전달손실 증가분, 그림 1b)과 음(전달손실 감소분, 그림 1c)으로 나누어 살펴보았다.

그림 1b에서는 준관성주기의 내부파가 연안으로 접근하면서 전체적인 전달손실이 음원으로부터 멀수록 증가(5-6 dB 정도)하는 경향을 보였고, 그림 1c에서는 전체적인 전달손실보다 특정 위치에서의 전달손실이 10 dB 이상으로 매우 크게 나타났다.

이와같은 준관성주기 내부파로 인한 전달손실 변화 효과는 그림 2에서도 확인할 수 있다. ± 5 dB 범위의 전달손실에 대해서는 내부파가 존재하면서 전달손실이 증가하는 경우(그림 2b)가 감소하는 경우에 비해 큰 빈도를 가지지만, ± 5 dB 이상의 전달손실 변화가 발생하는 빈도는 내부파가 존재하면서 전달손실이 감소하는 경우(그림 2a) 오히려 더 크다.

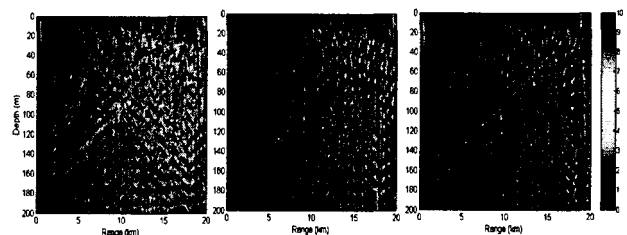


그림 1. 준관성주기 내부파의 전달손실 분석. (a)준관성주기 내부파 존재시 전달손실 분산 영향. (b) 준관성주기 내부파가 있는 경우에서 없는 경우를 뺀 양의 값. (c) b의 경우 음의 값

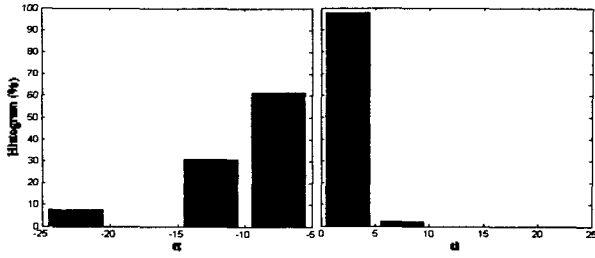


그림 2. 수심 80m에서의 전달손실 변화에 대한 히스토그램. (a) 준관성주기 내부파가 있는 경우에서 없는 경우를 뺀 음의 값. (b) a의 경우 양의 값

4. 음도파관 불변 이론을 이용한 내부파의 음향학적 영향 분석

모드 사이의 간섭 현상으로 생긴 간섭패턴의 기울기가 내부파에 의한 해양환경의 변동에 따라 특징적으로 달라지게 된다. 여기서는 영향을 가장 크게 미치는 준관성주기 내부파에 대해서만 다루었다. 그림 3에서는 음파전달 모델(RAM)을 이용하여 준관성주기 내부파가 없는 경우(좌측)와 준관성주기 내부파가 있는 경우, 오목형(가운데)과 볼록형(우측)으로 나누어 거리-주파수 영역에서 전달손실의 간섭패턴을 살펴보았다. 준관성주기 내부파가 없는 경우와 볼록형 준관성주기 내부파가 있는 경우 거리-주파수에 대한 간섭패턴 기울기는 1정도로 나타났으나 오목형 준관성주기 내부파가 있는 경우에는 기울기 패턴이 ∞ 과 1이 복잡하게 나타났다.

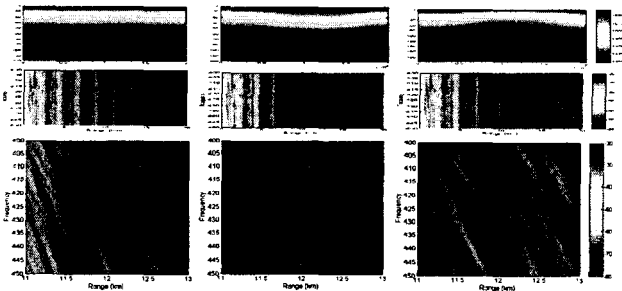


그림 3. 준관성주기 내부파가 없는 경우(좌측)와 준관성주기 내부파가 있는 경우 오목형(가운데)과 볼록형(우측)패턴에 대한 거리-주파수의 간섭무늬 패턴. 위쪽은 음속구조 단면도이며 아래는 각각의 간섭무늬 패턴을 나타내고 맨 아래는 거리 11-13km에 대해 간섭패턴을 확대한 그림.

이 기울기 값에 대해 군속도와 위상속도의 비로 설명할 수 있는 음도파관 불변 이론(Waveguide invariant theory)을 적용하여, 내부파로 인한 해양환경 변화를 음향학적으로 정량화 할 수 있다.

4.1 음도파관 불변 이론(Waveguide invariant theory)

정상모드(normal mode)에서 음압(P)과 음세기(I)는

$$P(r) = \sum_m A_m \exp(ik_m r) \quad (1)$$

$$I(r) = \sum_{m,n} A_m A_n \cos(\Delta k_{mn} r) \quad (2)$$

과 같이 나타낼 수 있으며 주파수와 위상속도(c)의 함수인 m 모드와 n 모드 사이의 파수 차, Δk_{mn} 는 $\Delta k_{mn}(\omega, c) = k_m - k_n$ 와 같다. 그림(3)에서 일정한 I 를 따라서는 위상 변화가 없으므로,

$$\delta\Phi = \frac{\delta r}{r} + \frac{\delta\Delta k_{mn}}{\Delta k_{mn}} = 0 \quad (3)$$

가 된다. 단, 여기서 $\Phi \equiv \Delta k_{mn} r$ 이다. 식(3)은

$$\frac{d\omega}{dr} = -\frac{\partial I / \partial r}{\partial I / \partial \omega} \quad (4)$$

와 같이 표현되며, 식(2)를 식(4)에 대입하면 아래와 같은 음도파관 불변 이론(Waveguide Invariant Theory)을 정의할 수 있다(Brekhovskikh and Lysanov, 1991).

$$\frac{\partial r}{r} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial \omega}{\omega}, \quad \beta = -\frac{\Delta S_{p,mn}}{\Delta S_{g,mn}} \quad (5)$$

여기서 $\Delta S_{g,mn} = S_{g,m} - S_{g,n}$, $\Delta S_{p,mn} = S_{p,m} - S_{p,n}$ 이며 모드간의 군속도와 상속도와의 비로써 β 를 나타낼 수 있다.

4.2 내부파에 의한 간섭의 음향학적 분석

이상적인 해양환경에서 일정한 값을 갖는 β 는 반사환경에서 1, 굴절환경에서 -3의 값을 갖는다(Brekhovskikh and Lysanov, 1991). 반사와 굴절이 혼합된 환경에서는 $-1/3 < 1/\beta < 1$ 의 범위를 가지게 된다. 그림 3에서 내부파가 없는 경우와 볼록형 준관성주기 내부파가 있는 경우 β 값이 1정도로 나타났고 오목형 준관성주기 내부파가 있는 경우에는 β 값이 ∞ 과 1로 복잡하게 나타났다. 음도파관 불변 이론(Waveguide invariant theory)을 적용한 정상모드 모델을 사용하여 군속도와 위상속도의 비(β 값)를 구하였다. 그림(4 좌)는 오목형(적색)과 볼록형(파란색)의 준관성주기 내부파가 존재할 때의 음속 수직구조를, 존재하지 않는 경우(검정색)와 비교하여 나타낸 것이고, 그림(4 우)는 각각의 모드에 해당하는 군

속도와 위상속도의 관계를 나타냈으며 이 관계에서 β 값을 구할 수 있다. 굴절과 반사가 혼합된 해양환경을 고려($-1/3 < 1/\beta < 1$) 각각 모드들에서 내부파가 존재하는 경우와 존재하지 않을 경우 사이에 $1/\beta$ 값의 차이를 비교해보면, 블록형 준관성주기 내부파의 경우는 차이가 거의 나타나지 않으나(두 경우 모두 $1/\beta \approx 1$ 즉 $\beta \approx 1$), 오목형 준관성주기 내부파는 $1/\beta$ 값의 차이가 크게($1/\beta \approx 0, -1/3, 1$ 즉 $\beta \approx \infty, -3, 1$) 나타난다. 이는 거리-주파수 영역의 전달손실 분포(그림3 맨 아래)에서 나타난 기울기와 유사한 값을 갖는 것을 확인 할 수 있다.

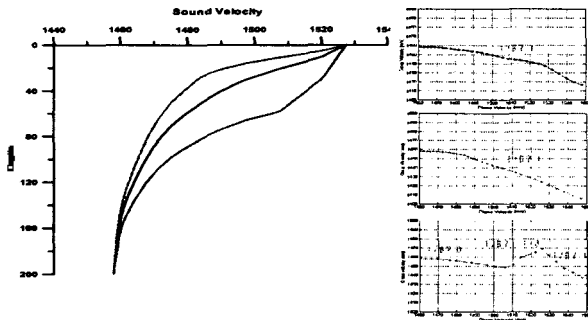


그림 4. (좌) 준관성주기 내부파가 존재하지 않을시 (검정색)와 오목형(파란색)과 블록형(적색)의 준관성주기 내부파가 존재시 음속 수직구조. (우) 각각의 군속도와 상속도간의 비 및 $1/\beta$ 값.

5. 결론

내부파의 물리적 특성으로 준관성주기 내부파의 수평 파장은 20-38 km, 수평위상 속도는 31-57 cm/s로 나타났고 단주기 내부파는 외해에서 내해로 약 20-70 cm/s의 위상속도로 전파하고 진폭이 최대 20 m에 이르는 내부파가 종종 관측되었다. 음파전달 모델을 통해 단주기 내부파에 의해서 전달손실이 일정거리(약 2 km)간격으로 ± 20 dB까지 발생하였다. 준관성주기의 내부파가 연안으로 접근할 때 전체적인 전달손실은 음원으로부터 멀수록 증가(5-6 dB 정도)하지만, 특정 위치에서는 10 dB 이상으로 전달손실이 크게 감소하기도 했다. 내부파에 의한 해양환경 변동에 있어 거리-주파수 영역에서의 전달손실 간섭패턴을 음도파관 불변이론을 적용한 군속도와 상속도간의 비(β 값)로써 나타내어 확인하였고 또한 준관성주기 내부파가 없는 경우 및 블록형 준관성주기 내부파가 있는 경우 보다 오목형 준관성주기 내부파가 있는 경우 $1/\beta$ 값의 차이가 크게($1/\beta \approx 0, -1/3, 1$ 즉 $\beta \approx \infty, -3, 1$) 나타남을 통해 내부파로 인한 해양변동성에 대해 음장패턴 변화를 살펴보았다.

참고문헌

1. Nam, S. H., H. R. Kim, J.-Y. Yun, and K. Kim, 2004, Propagation, refraction, and deformation of internal solitary waves observed near the mid-east coast of Korea, Proceedings of 1st AOGS meeting
2. Kim, D.-J., Nam, S. H., K. Kim, and W.-M. Moon, 2004, Observation of internal waves in the East (Japan) Sea by synthetic aperture radar, Proceedings of IGARSS 2004 meeting in Anchorage, Alaska.
3. Collins, M.D., 1993. A split-step Pade solution for parabolic equation method. J. Acoust. Soc. Am., 93 : 1736-1742
4. G. L. D'Spain and W. A. Kuperman 1999, Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth, J. Acoustic. Soc. Am 106
5. Daniel Rouseff, 2001. Effect of shallow water internal waves on ocean acoustic stration patterns, Waves Random Media 11 377-393
6. Brekhovskikh L M and Lysanov Y P 1991 Fundamentals of Ocean Acoustics 2nd edn pp 140-5
7. Lie, H.-J., 1988, Near-inertial current oscillations off the mid-east coast of Korea, Prog. in Oceanogr. 21(3-4), 241-253.
8. Kim, H. R., S. Ahn, and K. Kim, 2001. Observations of highly nonlinear internal solitons generated by near-inertial internal waves off the east coast of Korea. Geophys. Res. Lett. 28(16):3191-3194.
9. Kim, Y. H., S. H. Nam, S. J. Lyu, K. Kim, Y. G. Kim, and T. B. Shim, 2003. 2002-2003 observation on the short-period internal waves near and off the Donghae city, Korea, 18th Underwater Acoustics Symposium Proceedings
10. Nam, S. H., S. J. Lyu, and K. Kim, 2003a, Propagation and reflection of near-inertial and semi-diurnal internal waves off the Korean east coast, Proceedings of Korean Society of Oceanography
11. Nam, S. H., B. Y. Han, S. L. Kim, J.-Y. Yun, K. Kim, 2004, Physical characteristics of internal waves and its influence on acoustic propagation in the East Sea, Proceedings of SWSS 2004 meeting, Korea.