

천해에서의 내부파에 의한 잔향음 특성

박종민, 나정열

한양대학교 지구해양과학과

Characteristics of Reverberation due to Internal Wave in Shallow Water

Jongmin Park, Jungyul Na

Hanyang University Dept. of Earth and Marine Sciences

요약문

천해에서의 음파전달은 심해와 비교하여 복잡하고 경계면의 영향을 많이 받으며 서해에서 하계의 평균 수온자료로 잔향음을 계산한 결과 해저면 잔향음(reverberation)이 가장 우세한 것으로 나타났다. 특히 서해에서는 하계에 내부파에 의한 강한 수온약층의 생성이 관측되었으며, 이런 현상은 음파전달에 많은 영향을 줄 것으로 예측된다. 내부파를 조석에 의한 장주기와 단주기로 구분하여 적용한 결과 고주파 음원을 사용할 경우 장주기 내부파에 의한 수온약층의 수직변동에 따른 잔향음은 최대 13dB까지 차이가 났으며 단주기 내부파의 경우 수온약층의 하강한 경우 수온약층이 상승한 경우보다 근거리에서 전달손실 변화가 작았다.

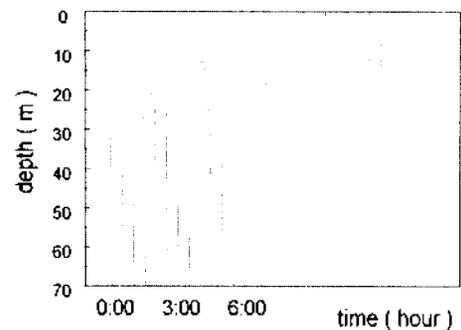
1. 서론

해양에서 내부파(internal wave)는 밀도가 다른 수직구조의 두 층의 경계면에서 발생하며 이 경계면에서는 수심에 따라 수온이 급격히 감소하는 수온약층(thermocline)이 생긴다. 내부파의 발생원인은 정확하게 규명되지는 않았지만 복잡한 해저지형과 폭풍, 해수면의 강한 바람과 조석 등이 원인으로 알려져 있고, 내부파의 크기는 수평적으로 0.1-10km, 수직적으로 1-100m의 범위이며, 그 주기는 10분에서 1일까지 될 수 있다[1]. 내부파는 다음의 식으로 나타낼 수 있다[2,3,4].

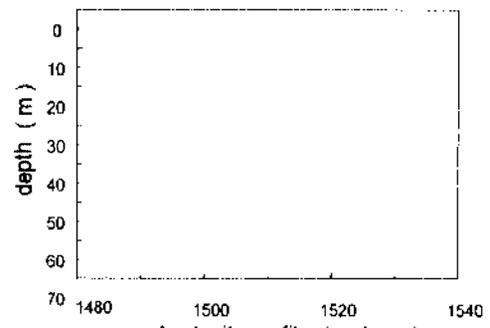
$$\frac{d^2W}{dz^2} + k^2 \left(\frac{N^2(z) - \omega^2}{\omega^2 - f^2} \right) W = 0$$

W는 속도의 수직성분이며 여기에서 N(z)은 부력주파수(Brunt-Väisälä frequency or buoyancy frequency)이며, k는 파수, ω 는 각주파수 f는 관성주파수(inertial frequency)이다.

또한 N은 $\left[\frac{3600}{2\pi} \left(\frac{g}{\rho(z)} \right) \left(\frac{d\rho(z)}{dz} \right) \right]^{1/2}$ (cph/cycle per hour)의 식으로 계산되며, $\rho(z)$ 는 수심 z에 대한 밀도이고, g는 중력가속도이며 계산에 의하면 N은 심해에서 0 cph에 근접하며, 해수



(a) 표준화한 음속구조



(b) 서해의 하계 평균 음속구조
그림 1. 음속구조.

면 근처의 성층화 된 부근에서 10 cph정도이다. f 는 $\sin \phi / 12$ cph의 식으로 나타나며, 위도에 따라 값이 정해진다(ϕ 는 위도). 위도 30°의 경우 f 는 1/24 cph가 된다.

내부파의 주파수 스펙트럼은 최대 부력주파수와 최소 관성주파수 사이 값을 갖게 되고, 서해의 경우 위도 34°에서 최대 21시간 주기, 위도 39°에서 19시간 주기가 가능하다. 최소주기는 성층화에 따라 약 2분이 된다. 내부파에 대한 연구는 국외의 경우 주로 대양에서 수행되고 있으며, 미국은 해군연구소(NRL)를 중심으로 천해 단주기 내부파와 solitary internal wave에 의한 음파전달 영향을 연구하고 있다. 중국에서는 미국과 함께 서해에서 96년부터 SWAC(The Shallow Water Acoustics Conference)를 통해 실험 및 연구결과가 발표되었다[5]. 기존의 연구는 천해에서 내부파는 저주파수의 장거리 음파전달에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 국내에는 내부파에 대한 연구사례가 거의 없으며 동해에서의 내부파 특성연구가 진행 중이다[6,7]. 서해는 평균수심 44m의 천해로서 낮은 여름에 강한 수온약층이 관측되고 있고 수m의 수심변화에서 최대 15 °C의 수온변화가 관측되었다. 그림 1에서 표준화한 음속구조와 수산진흥원의 평균 음속구조를 비교하였다.

2. 잔향음 계산

능동 소오나를 이용하여 수중 표적을 식별하려는 경우 수신된 신호는 표적신호(target signal) 뿐만 아니라 주변소음(ambient noise)와 잔향음이 포함되어 있다. 잔향음이 주된 제한환경이 되는 천해에서의 잔향음 특성분석은 원하는 신호 분석을 위한 중요한 작업이다. 일반적인 능동 소나 방정식은

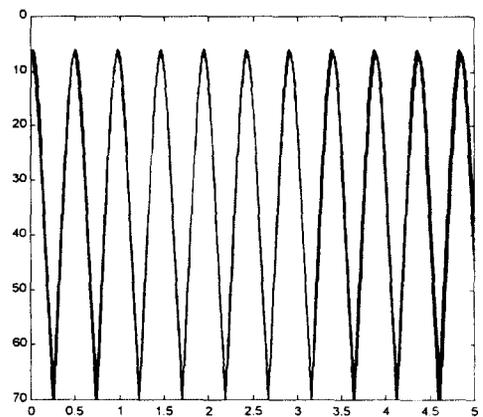
$$SL - 2TL + TS = NL - DI + DT$$

로 나타낼 수 있고 잔향음 제한 환경에서의 능동 소나 방정식은 아래와 같다.

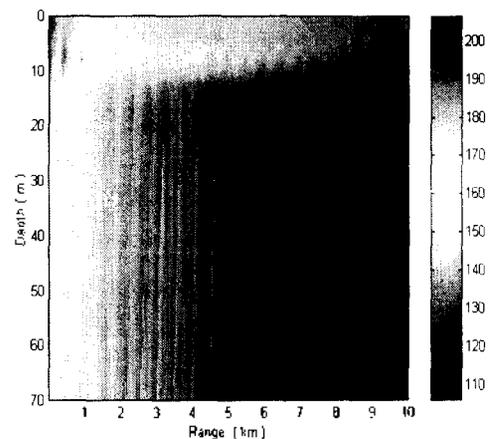
$$SL - 2TL + TS = RL + DT$$

여기에서 SL(source level)은 음원준위, TL(transmission loss)은 전달손실, TS(target strength)는 표적강도, NL(noise level)은 소음준위, DI(directionality index), DT(detection threshold)는

검출역치, RL(reverberation level)은 잔향음 준위를 나타낸다. 위 식에서와 같이 일정한 음압준위에서 표적의 탐지여부는 잔향음 준위에 의해 결정된다. 이 논문에서 사용한 수온자료는 SWAC'97에서의 내부파 관측 자료와 수산진흥원의 36년간의 평균 자료를 사용하였다. 내부파는 장주기와 단주기로 구분할 수 있으며 서해에서의 조석에 의한 장주기의 내부파의 경우 주기가 상대적으로 길고 음원이 고주파이며 짧은 펄스를 사용하여 거리독립 환경으로 분석하였다. 단주기의 내부파의 경우 SWAC'97 자료로부터 주기 30분, 파장 1000m를 가정하여 500m 마다 다른 음속구조를 사용하여 거리종속 음향모델을 이용하여 전달손실을 계산하였다.



(a) 음선추적

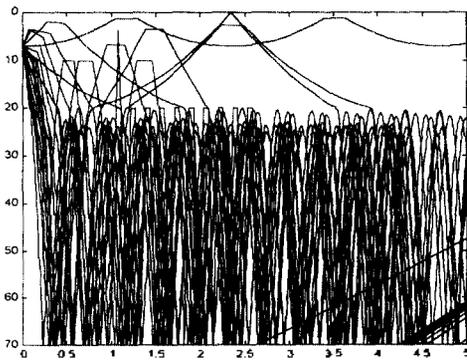


(b) 음압준위

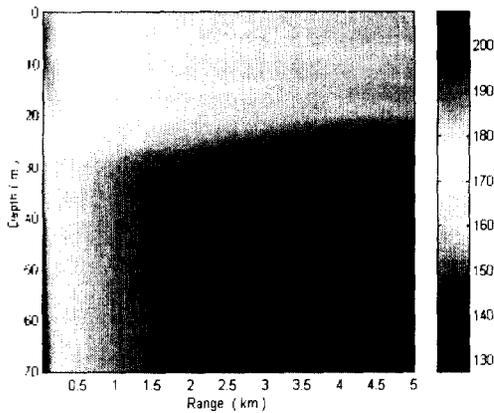
그림 2. 수온약층 상승시

3. 음향 모델 적용 결과

음향모델에서 음원준위는 230dB, 음원수심은 7m, 수신기 수심은 25m, 펄스길이는 200ms로 사용하였다. 수온약층이 얇은 수심에서 형성된 경우 음선 추적(ray tracing)은 규칙적으로 해저반사 현상이 일어나는 것을 볼 수 있으며 해수면 근처에서 음파 전달이 이루어지지 않는 음영구역(shadow zone)을 형성하고 해수면에 비해 해저면의 영향을 많이 받는 것으로 나타났고 음압준위(pressure level)는 수심 10m이하에서 감소하는 경향이 강하다(그림 2). 또한 수온약층이 깊은 수심에서 형성시 음선 추적과 음압준위는 수온약층이 낮은 수심에서 생긴 경우와 다른 양상을 보이고 있다. 해저면의 영향을 많이 받지만 해저반사가 규칙적으로 일어나지 않으며 음압준위가 상대적으로 높다(그림 3).



(a) 음선추적



(b) 음압준위

그림 3. 수온약층 하강시

수온약층의 상승 하강시 잔향음의 변화 양상은 공통적으로 시간에 따라 완만한 감소를 보이며 수온약층이 낮은 수심에 형성시 해저면의 영향에 따라 잔향음 준위가 변동하는 것을 볼 수 있다. 또한 수온약층이 하강 시에는 해저면의 영향이 나타나지만 비교적 완만한 감소를 보인다. 두가지 경우에 있어서 잔향음 준위의 시간적 변화량은 그림 4와 같고 시간에 따른 최대 변화량은 13dB까지 나타났다.

또한 수온약층 변화에 따른 능동 신호 이득을 비교하면 수온약층 상승 시에는 변동이 심하게 나타나며 거리에 따라 신호이득이 강하지만, 수온약층 하강 시에는 완만한 감소양상을 보이며 안정적인 탐지거리를 보인다(그림 5).

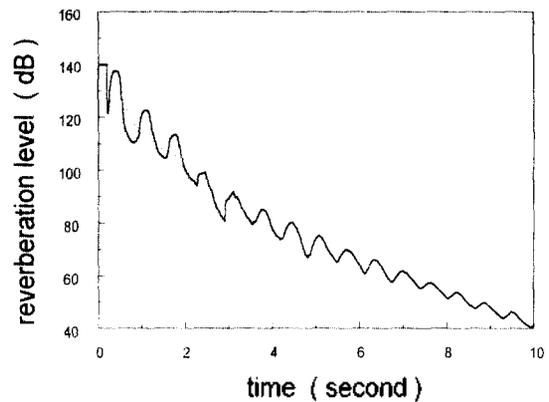


그림 4. 수온약층 상승 하강에 따른 잔향음 준위 변화(dot : 상승시, straight : 하강시)

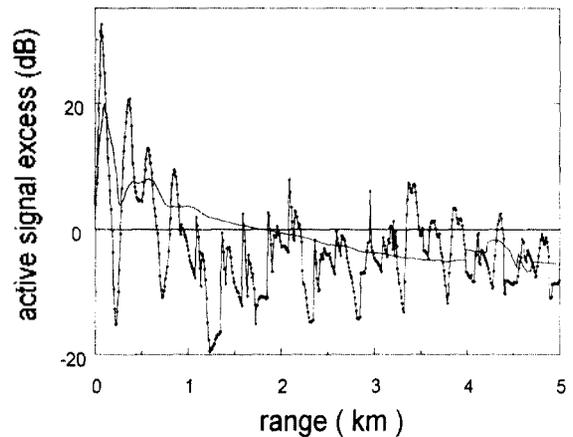


그림 5. 수온약층 위치에 따른 능동 신호 이득 비교 (dot : 상승시, straight : 하강시)

장주기의 내부파의 경우 거리독립 음향모델을 사용하여 간향음을 계산하였으나, 단주기의 내부파의 경우 거리종속 음향모델을 사용하여 전달손실을 계산하였다. 단주기의 내부파의 경우 주기 30분, 파장(wave length)을 1000m로 가정하고 음원이 내부파에 의해 수온약층이 상승한 수온구조 위치에 있을 경우 음원의 위치가 수온약층 내부에 있게 됨으로 음파의 하향굴절이 강하게 나타나(그림 6) 전달손실이 약 2.5km까지 변화가 심한 반면 수온약층이 하강한 위치에 음원이 있을 경우 수온약층의 상부에 위치하게 됨으로서 전자에 비해 변화가 적었다. 그러나 2.5km 이상에서는 두 경우가 유사한 결과를 나타내었다(그림 7).

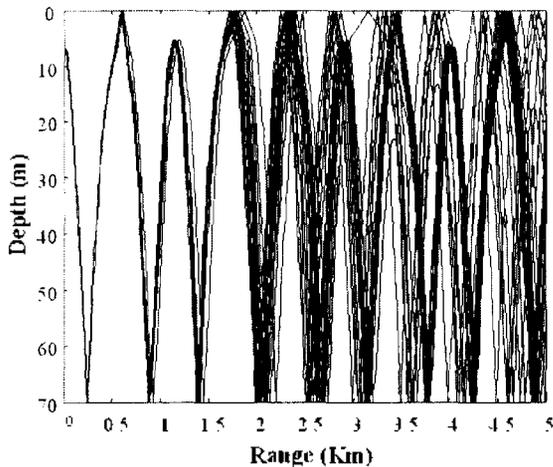


그림 6. 단주기 내부파 음선추적

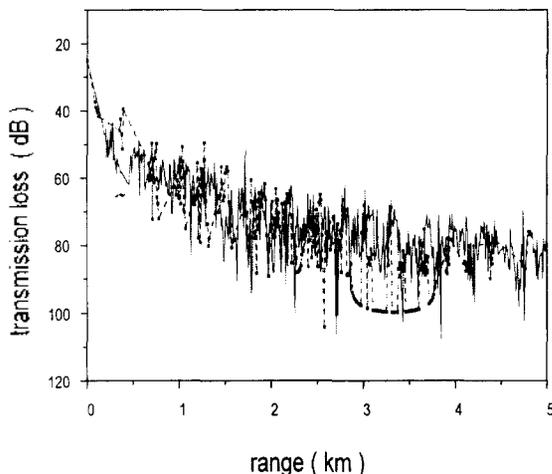


그림 7. 단주기 내부파 형성시 전달손실 비교 (dot : 음원이 수온약층 내부에 위치, straight : 상층부에 위치)

4. 결과 및 고찰

음향 모델을 통해 조석 및 기타원인에 의한 내부파의 생성을 가정하여 수온약층의 변동에 따른 음파진달의 특성을 알아보았고, 천해에서 음파전달의 가장 큰 제한 요소인 간향음의 변화양상을 분석하였다. 이러한 변동은 실제 해양에 있어서 짧은 시간의 소나 작동 시 중요한 교란 요인으로 작용 하리라 생각된다. 따라서 능동 소오나를 일정시간 지속적으로 운용시 내부파에 의한 영향을 고려해야 할 것이다. 수온약층의 변위에 따라 산향음 준위는 최대 13dB까지 차이가 났으며 단주기 내부파에 의한 수온약층의 상승 및 하강에 의한 효과로 동일한 음원수심에서도 전달손실은 근거리(2.5km 이내)에서 변화가 나타났다. 내부파에 의한 수온약층의 변동 기작에 대한 연구와 내부파의 장주기 및 단주기에 대한 지속적인 관측과 연구가 필요하다.

참고문헌

1. H. B. Ali. "Oceanographic variability in shallow -water acoustics and the dual role of the sea bottom", IEEE J. Oceanic Eng., vol. 18(1), 31-41, 1993.
2. S. Flatté, R. Dashen, W. Munk, K. Wasin, F. Zachariassen, "Sound Transmission Through a Fluctuating Ocean", Cambridge University Press, 1977.
3. S. A. Chin-Bing, D. B. King, J. D. Boyd, "The Effect of Ocean Environmental Variability on Underwater Acoustic Propagation Forecasting" in Oceanography and Acoustics Prediction and Propagation Models, edited by A. R. Robinson, D. Lee, AIP Press, pp7-49.
4. Dirk Tielbürger, Steven Finette, Stephen Wolf, "Acoustic propagation through an internal wave field in a shallow water waveguide", J. Acoust. Soc. Am. 101(2), PP789-808, 1997.
5. Gary W. Caille, Peter H. Dahl, Zijun Gan, Guoliang Jin, Liangyin Lei, Peter H. Rogers, Robert C. Spindel, Zheng Sun, Renge Zhang, Ji-Xun Zhou, "Overview of the joint CHINA-U.S. "YELLOW SEA '96" experiment", SWAC'97, pp17-22.
6. 국방과학연구소, 수중음향 특화연구센터(수중음향 모델링 연구실)1단계 1차년도 연구보고서, TEMD-417-980087, 1998.
7. 나영남, 심내보, 김형로, 김구, '한국 근해에서 관측된 내부파와 음파손실의 스펙트럼 특성', 제13회 수중음향학 학술발표 논문집, 1998.