

대륙붕 해역에서의 주요 해양현상과 수중음파의 음장변화 고찰

Study on the Major Oceanographic Phenomena and Pressure Fields Variation of Underwater Acoustic Waves in Continental Shelf Areas

나영남, 김영규, 최진혁, 심태보

Young-Nam Na, Young-Gyu Kim, Jin-Hyuk Choi, Taebo Shim

국방과학연구소 (진해)

Agency for Defense Development (Chinhae)

E-mail : ynna@sunam.kreonet.re.kr

요 약

본 연구에서는 한국 동해 대륙붕 해역에서의 주요 해양현상인 수직 수온구조의 단기변동, 수온전선, 그리고 내부파의 변동을 분석하고 이들 변화에 따른 음파의 음장변화를 고찰하였다. 한국 동해항 근해에서 수온의 수직적 변화는 계절적인 변화 이외에 약 2주간의 짧은 기간에도 매우 극적인 변화가 존재함이 실측자료를 통해 밝혀졌다. 1999년 관측된 CTD 자료를 바탕으로 음장 변화를 살펴본 결과 주파수 1 kHz, 음원수심 30 m 인 경우 수신기 수심에 따라 최소 3 dB, 최대 10 dB까지 차이를 가져올 수 있음을 알 수 있었다. 한국 동해에서 연안과 외해 사이에는 수온전선이 매우 자주 발달하며 여름에 가장 강한 것으로 알려져 있다. 동해항 근해에는 대표적인 수괴인 대마난류수와 북한난류수가 공존하며 이들의 상대적인 세력 변화 때문에 수온(음속)이 거리에 따라 급격하게 변하는 수온전선이 발달할 수 있다. 저주파수 대역 (200 Hz)에 대한 간단한 시뮬레이션 결과는 수온전선이 정상적인 분포에 비해서 거리에 따라 7 dB 정도의 큰 전파손실을 초래할 수 있음을 보인다. 한국 동해 연안에도 내부파가 존재한다는 사실이 최근 3년간의 연구 결과 밝혀졌다. 내부파는 외해에서 발생하여 대륙단을 거쳐 대륙붕으로 진행해 오면서 내부파 군 (Packets)으로 분산된다. 수직적 변화가 전체 수층의 14 %를 차지하는 간단한 형태의 내부파를 가정하여 음장변화를 시뮬레이션 한 결과 주파수 1 kHz, 음원수심 20 m인 경우 내부파는 수렴구역 형성을 현저하게 방해하여 최대 5 dB까지의 차이를 유발하였다. 추후 이에 대한 연구는 내부파 전체의 시,공간적 분포 특성

이 구체적으로 규명되면 보다 정확한 음장변화 추정이 이뤄져야 할 것으로 보인다. 또한 내부파와 음파의 상대적인 진행 방향에 따라 음장변화가 크게 다를 것이 예상되므로 이를 규명하기 위해서는 궁극적으로 3차원적인 음장분포 연구가 필요하다. 음향센서를 해저면에 매설할 경우 수층의 수온변화와 센서 주변의 수온변화 사이에는 어느 정도의 시간지연이 존재하게 되므로 이에 대한 영향을 규명하는 것도 센서의 성능예측을 위해서 필요하리라 사료된다.

1. 서 론

한국 동해는 천해와 심해가 공존하며, 이 양자간에는 수심변화가 급격한 대륙단 (Shelf Break)이 천이해역으로서 존재한다. 이에 따라 이 해역에서는 천해와 심해의 해양현상이 공존하기도 하고 서로 영향을 미치기도 한다. 이러한 수층의 현상중 대표적인 것들로는, 1) 난류와 난류의 세력변동에 의한 2주 이내 단기 수직 수온 구조 변화, 2) 수평적 수온변화가 큰 수온전선(Thermal Front), 3) 심해에서 생성되어 천해로 전파되고 소멸되는 내부파 (Internal Waves) 등이 있다.

이러한 복잡한 해양환경하에서 수중음향 센서를 운용할 경우 그 센서의 성능은 환경변화에 의해서 절대적으로 좌우될 것이다. 그러므로 이러한 변화에 의한 음장변화의 영향 정도를 추정하는 것은 추후 연구의 방향을 설정하는데 있어서 우선적으로 요구된다 하겠다.

본 연구에서는 위의 3가지 해양현상 정도를 분석하고 각각에 의한 음장변화 정도를 추정하고자 한다. 또한 이 해역에서 현재까지 이루어진 연구결과를 종합,

점검하여 앞으로 만족할 만한 시·공간적 음장분포 모델링을 위해서 반드시 요구되는 연구분야도 제시하고자 한다.

2. 수직 수온구조의 단기변동과 음장분포 변화

한국 동해안은 대표적으로 대마난류수와 북한한류수가 공존하면서 이들 두 수괴의 세력변동에 의해 수온의 시·공간적 분포가 크게 바뀌게 된다. 이에 따라 수온의 수직적, 수평적 구조도 크게 바뀌게 되며 이는 수중에서 운용되는 음향센서의 성능에 절대적인 영향을 미치게 된다. 그리고 해양환경의 계절적인 변화와 함께 국지적인 변동도 무시할 수 없을 정도로 큰 것으로 알려져 있다.

<그림 1>은 수중음향 특화연구센터에서 약 5개월간 일정 간격으로 동해항 근해에서 관측한 CTD 자료[1]의 시간변화와 5월에 관측된 두 자료의 수온 단면도를 나타낸다. 5개월에 걸친 수온의 시간변화는 매우 복잡한 가운데 특히 북한한류수와 관련된 것으로 보이는 5°C 등온선의 변화가 심하다는 점을 알 수 있다. 5월에 관측된 두 수직 단면도는 약 2주일의 시차를 지니고 있는데 수온약층의 위치가 크게 다름을 알 수 있다. 즉, 5월 26일 관측된 자료는 표층에서 40 m 수심까지 잘 혼합된 관례로 수온약층이 2주전 보다 훨씬 아래로 밀려나 있다.

위와 같이 극단적으로 달라지는 수온구조하에서 음장의 변화를 비교 분석하였다 (<그림 2>). 시뮬레이션에 이용된 주파수는 1 kHz이고 음원의 수심은 30 m이다. 수신기 수심이 10 m일 경우 (<그림 2a>), 두 결과는 아주 큰 전파손실 차이를 보이는데 특히 거리 2 km 이상에서 혼합층이 발달한 5월 26일 수온구조하에서 10 dB 정도 전달손실이 적음을 알 수 있다. 이에 비하여 수신기 수심이 60 m일 경우 양자간의 차이는 많이 줄었으나 여전히 5월 26일 수온구조하에서 3~5 dB 전파손실이 작음을 볼 수 있다.

3. 수온전선에 의한 음장변화

한국 동해안은 대마난류수와 북한한류수가 공존하면서 그 상대적인 세력에 따라 연안의 수평적 음속구조가 크게 달라진다. 일반적으로 북한한류수는 여름철에 그 세력이 가장 강한 것으로 알려져 있다. 이 경우 보통 연안 쪽에는 북한한류수의 특징의 하나인 냉수가 위치하고 외해 쪽에는 고온 고염의 대마난류수가 위치함에 따라 그 경계면에서는 강한 수온전선이 존재한다. 따라서 외해에 음원이 존재할 경우 그 음장의 변화는 수온

전선이 존재하지 않을 경우에 비해서 크게 달라질 것으로 예상된다.

<그림 3>은 음원과 수신기 사이에 전형적인 수온전선이 존재할 경우 음장의 변화 시뮬레이션 결과의 한 예이다. 이 경우 주파수는 200 Hz, 음원 수심은 50 m이며, 수온전선은 음원으로부터 1 km 거리에서 시작된다. 전반적으로 수온전선이 존재할 경우에 존재하지 않는 경우보다 전파손실이 크며, 두 경우간 차이는 거리 10 km 이하에서 평균적으로 7 dB 정도에 이르는 것을 볼 수 있다.

4. 내부파에 의한 음장변화

내부파는 수층 내부의 밀도가 크게 다른 두 층의 경계면에서 발생하는 파로서 주기가 보통 수분~수십분, 파장이 1 km 내외이다. 최근의 연구 결과 내부파는 음파의 전파에 영향을 주어 비정상적으로 큰 손실을 일으키는 것으로 알려져 있다 [2, 3]. 미국을 중심으로 한 선진국은 천해에서의 내부파에 지대한 관심 속에 지속적인 투자를 하고 있는데, 주로 음향학적인 영향에 연구의 초점을 맞추고 있다.

한국 동해에도 강한 수온약층을 중심으로 한 내부파가 존재할 것으로 여겨져 왔으며, 특화연구센터를 중심으로 한 3년간의 연구결과 내부파의 존재를 규명하였다 [1]. 그 결과 내부파는 수직적으로 최대 30 m에 걸쳐 나타나며 (전체 수심의 22 % 해당) 몇 개의 파가 다발을 이루는 소위 Packets 형태로 존재한다. 또한 스펙트럼 분석 결과 내부파의 주기는 단일 주기보다는 2-17 분 사이의 여러 주기가 혼합된 형태임이 밝혀졌다 [5]. 이렇게 한국 동해안에 내부파가 존재할 경우 거리 10 km에서 최대 5 dB 정도의 전파손실의 변동을 가져오고, 이는 바로 음파를 이용하여 표적을 탐지하는 센서들의 성능 변화를 가져오는 것으로 이어진다 [4, 5]. 내부파가 음파의 전파에 영향을 미치는 기작은 모드간 간섭으로 설명하기도 한다 [2].

기존 심해에서 내부파의 발생 기작을 연구하는 데는 KdV (Korteweg de Vries) 방정식 [6]이나 약한 2차원 효과를 고려한 KP (Kadomtsev-Petviashvili) 방정식 [7,8]을 이용하여 왔다. 그러나 천해에서는 파간에 강한 상호 작용이 이뤄지고 해저면 및 섭들로부터의 반사가 심하여 결국 위의 방정식이 더 이상 적용이 어렵다는 사실이 밝혀지고 있다 [9]. Tomasson [7]은 2층 유체층을 가정하여 유도한 방정식을 수치 해석적으로 계산한 결과 다음 식과 같이 3차 비선형 항을 무시한 선형 해석적 해보다 내부파의 진폭이 감소되고 파형이 약간 분산되는 효과를 보였다.

$$\eta(x, t) = \alpha \operatorname{sech}\left\{\frac{x-ct}{l}\right\}. \quad (1)$$

여기에서

$$c = c_0 (1 + (\alpha + (h_2 - h_1)) / (2h_1h_2)),$$

$$c_0 = \sqrt{gh_0 \Delta p}, h_0 = h_1 h_2 / (h_1 + h_2),$$

$$l = 2h_1 h_2 / \sqrt{3\alpha(h_2 - h_1)},$$

a = 내부파의 진폭,
 h_1, h_2 = 두 개 층의 두께이다.

이렇게 비선형 내부파가 외해에서 수심이 감소하는 연안으로 접근할 경우 <그림 5>와 같이 여러 개의 Packets으로 나뉘어 소멸하는 과정을 거치게 된다[10].

5. 결론 및 추후 연구방향

동해항 근해에서 수중 음파가 전파되는데 큰 영향을 미칠 수 있는 수층의 변화로서 수층의 단기변화, 수온 전선, 그리고 내부파를 고려하였다.

수온의 수직적 변화는 계절적 요인 이외에도 2 주간의 짧은 기간 동안에도 매우 극적으로 변한다는 사실이 해양실험을 통해 밝혀졌으며, 이 경우 음장 변화는 (주파수 1 kHz, 음원수심 30 m) 수심에 따라 3~10 dB에 이를 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

또한 동해항 근해에는 대표적인 수괴인 대마난류수와 북한한류수가 공존하며 이들의 상대적인 세력에 따라서 수온(음속)이 거리별로 급격하게 변하는 수온전선이 발달할 수 있다. 저주파수 대역 (200 Hz)에 대한 간단한 시뮬레이션 결과는 수온전선이 정상적인 분포에 비해서 거리별로 7 dB 정도의 큰 전파손실을 초래할 수 있음을 보인다.

동해항 근해에도 내부파가 존재하며 이는 외해에서 생성되어 수심이 낮은 대륙붕으로 오면서 퇴화되는 형태인 Packets 형태를 지닌다. 간단한 형태의 내부파를 가정하여 시뮬레이션한 결과 (주파수 1 kHz, 음원수심 20 m) 내부파 존재시 활발한 간섭으로 인해 약 5 dB까지의 추가 전파손실을 가져올 수 있음을 보였다.

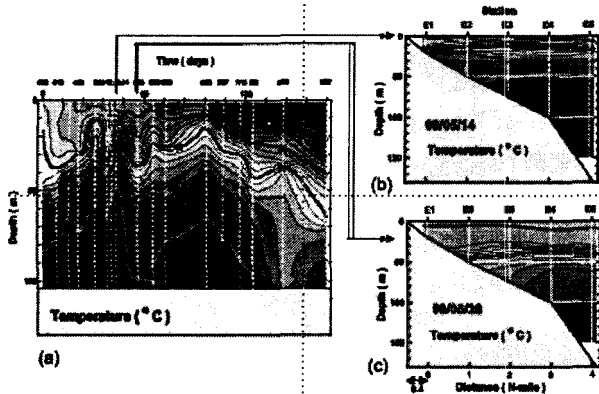
추후 내부파에 대해서는 이들의 시,공간적인 분포 규명과 함께 생성 기작에 대한 연구가 요구되며, 궁극적으로는 이들의 생성, 발달, 소멸에 이르는 과정의 모델링이 이뤄져야 한다. 이와 병행하여 내부파에 의한 음장변화를 적절하게 시뮬레이션하기 위해서는 3차원 환경을 수용할 수 있는 음향모델의 연구가 필수적이다.

음향센서를 해저층에 매설할 경우 수층의 수온변화와 센서 주변의 수온변화 사이에는 어느 정도의 시간지연이 존재하게 되므로 이에 대한 영향을 규명하는 것도 센서의 성능예측을 위해서 필요하리라 여겨진다.

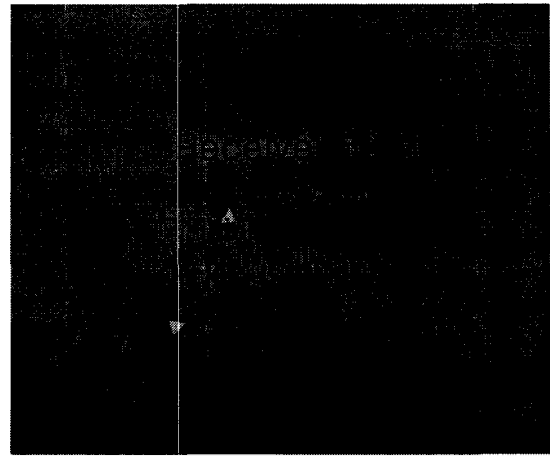
동해항 근해처럼 수층의 수직적, 수평적 변화가 단기간에 매우 극적으로 일어날 수 있는 환경에서 음향센서를 설치, 운용할 경우 필연적으로 일정 시간 간격으로 해양관측이 이뤄져야 한다. 또한 일반적으로 천해는 심해에 비해서 환경의 거리종속성이 훨씬 크므로 정확한 음장 계산을 위해서는 그만큼 정확한 퇴적층 특성 자료의 확보가 시급하다 하겠다.

참 고 문 헌

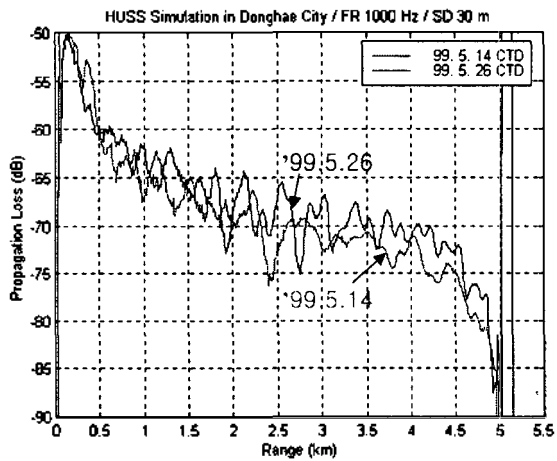
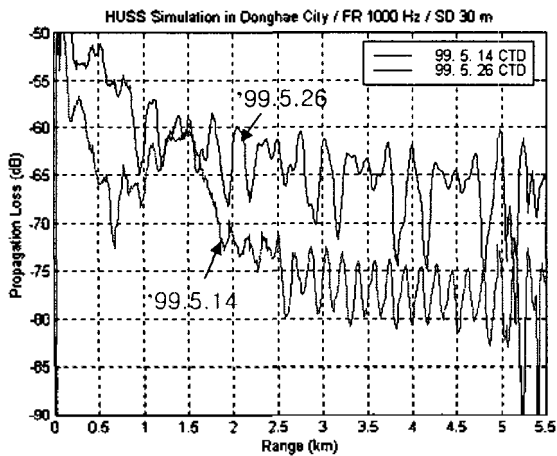
- [1] 김구, 김대철, 나정열, 김재수, 수중음향특화연구센터 수중음향모델링연구실 1단계 종결보고서, 국과연 보고서 TECD-420-991109, pp. 1-435, 1999.12.
- [2] J. X. Zhou and X. Z. Zhang, "Resonant interaction of sound wave with internal solitons in the coastal zone, "J. Acoust. Soc. Am. Vol. 90(4), 2042-2054, 1991.
- [3] J. F. Lynch, J. Guoling, R. Pawlowicz, D. Ray, C. S. Chiu, J. Miller, R. H. Brouke, R. Parson, A. P. 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.
- [4] 나영남, 최진혁, "천해 내부파가 수중음향 탐지시스템에 미치는 영향, "제 4 회 해군 해양과학기술 심포지움 논문집, pp. 177-193, 1998. 11.
- [5] Y. N. Na, M. S. Jurng, and T. Shim, "Interference of Acoustic Signals Due to Internal Waves in Shallow Water, "Acoust. Soc. Kor., Vol. 18(3E), pp. 9-20, 1999.
- [6] A. K. Liu, "Analysis of nonlinear internal waves in the New York Bight, "J. Geophys. Res., Vol. 93, pp. 317-329, 1988.
- [7] G. G. Tomasson, Nonlinear waves in a channel: Three-dimensional and rotational effects. Doctoral Thesis, M. I. T, 1991.
- [8] Y. Chen and P. L.-F. Liu, "The unified Hadomtsev-Petviashvili equation for interfacial waves, "J. Fluid Mech., Vol. 288, pp. 383-408, 1995.
- [9] A. K. Liu, Y. S. Chang, M. K. Hsu, and N. K. Liang, "Evolution of nonlinear internal waves in East and South China Seas, "J. Geophys. Res., Vol. 103, pp. 7995-8008, 1998.
- [10] P. Lynett and P. L. Liu, "Numerical modeling of internal wave-wave interactions, "Proc. AOPE, 1998.



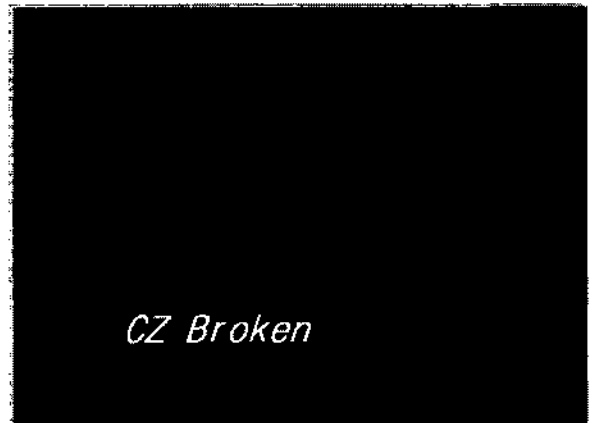
<그림 1> 동해항 근해에서 관측된 수온의 단기변동.
 (a) 관측점 E4에서의 '99. 4-'99. 8 사이 수온변화,
 (b)-(c) '99. 5. 14과 5. 26 관측된 수온의 수직 단면도.



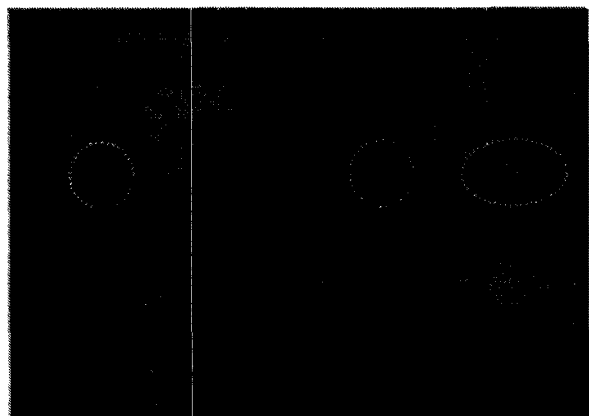
<그림 3> 수온전선에 의한 음파의 전파손실 시뮬레이션 결과 예 (주파수 200 Hz, 음원수심 50 m).



<그림 2> 단기간 수온변화에 의한 전파손실의 변동 시뮬레이션 결과 예 (주파수 1 kHz, 음원수심 30 m).
 위 : 수신기 수심 10 m, 아래 : 수신기 수심 60m.



<그림 4> 내부파에 의한 음파의 전파손실 시뮬레이션 예 (주파수 1 kHz, 음원수심 20 m).



<그림 5> 내부파의 생성, 발달, 소멸 모델링 결과 예 (Lynett and Liu, 1998).