

거리중속 표준해양을 이용한 해양음향 토모그래피

한상규[○], 나정열^{*}, 이재학^{**}

* 한양대학교 지구해양과학과 ** 한국해양연구소 해양물리연구부

Ocean Acoustic Tomography using by Range-Dependent Canonical Ocean

Sang Kyu Han[○], Jung Yul Na^{*}, Jae Hak Lee^{**}

* Dept. of Earth & Marine Sciences, Hanyang University

** Physical Oceanography Division, KORDI

요 약

동해의 경우 강한 극전선이 존재하여 북부해역과 남부해역의 음속구조는 커다란 차이를 보이고 있다. 이러한 해역에서 평균음속구조를 구하여 표준해양을 설정할 경우 음파 전파경로의 차이가 커지게 된다. 따라서 이러한 해역에서 해양음향 토모그래피를 이용한 해양탐사를 수행하기 위해서는 해역별로 다른 음속구조를 가지는 표준해양의 설정이 필요하며 이를 근거로 음파의 전파경로 및 도달시간의 기준을 설정할 필요가 있다. 기존의 해양음향 토모그래피에 의한 해양탐사는 대상해역의 평균 음속구조를 표준해양으로 설정하여 수온 및 수증음속의 변동량을 역추정하는 방법을 이용하고 있다. 본 연구에서는 인위적인 극전선을 설정하고 해역별 특징을 갖는 표준해양을 설정하여 음파 도달시간의 기준을 설정하고 음속구조의 역추정을 수행하여 기존의 해양음향 토모그래피에 의한 해양탐사 방법과 비교하였다. 그 결과 기존의 해양음향 토모그래피를 이용한 역추정에서는 전선의 형태를 재현하기 위해서 여러 개의 음원과 수신기가 필요하였으나 거리중속 표준해양을 이용할 경우 그 수가 줄어도 가능하고 평균오차도 작아지는 결과를 얻었다.

1. 서 론

해양음향 토모그래피 (OAT, Ocean Acoustic Tomography)는 대상해역의 평균 음속구조인 표준해양에서의 음파 도달시간과 음속구조변동에 의한 도달시간의 편위량과의 관계를 역이용하여 음속구조의 변동량을 역추정하는 해양탐사 방법이다. OAT를 이용한 해양탐사가 가능하기 위해서는 필수조건인 ① 음파전파경로의 식별, ② 안정성, 그리고 ③ 분해능을 만족하여야 한다[1]. 동해에서 OAT를 이용하여 해양탐사를 적용하기 위한 가능성은 이미 제시한바 있으며[2,3] 한 등[4]은 난수성 소용돌이와 극전선에 대한 수온분포의 역추정을 수행하여 그 오차와 해결과제 등을 제시하였다. 특히 동해와 같이 극전선이 강하게 존재하는 해역에서 OAT를 이용하여 해양탐사를 수행하기 위해서는 대상해역의 평균음속구조에 의한 거리중속 표준해양이 아닌 거리중속 표준해양의 필요성과 이를 이용한 OAT 방법을 제시하였다.

기존의 OAT에 의한 해양탐사는 대상해역의 평균음속구조를 표준해양으로 설정하여 음파 도달시간의 차이로부터 매질의 변동량을 역추정하는 방법이다. 동해와 같이 뚜렷한 음속구조의 변동이 있을 경우 음파의 전파경로가 달라져 전파경로의 안정성을 만족하지 못한다. 본 연구에서는 거리중속 표준해양을 이용하여 전파경로의 안정성을 최대한 만족하는 OAT의 forward problem과 역추정을 수행하여 가능성을 제시하고자 한다.

2. 동해의 음속구조 특성

동해의 경우 북부해역은 냉수피가 존재하고 남부해역은 난류수의 유입 및 복상으로 극전선이 항상 존재하는 특성을 보이고 있다. 동해의 음속구조는 극전선을 중심으로 커다란 차이를 보이는데 여름철보다는 겨울철에 그 차이가 크게 나타난다. 겨울철 북부해역의 음속구조는 표층이 약 1470 m/s이고 최소음속층은

300 m 정도에서 나타나며 이때의 음속은 약 1460 m/s 이지만(그림 1a) 남부해역은 표층이 약 1490 m/s, 최소음속층은 400 m 정도이고 음속은 1460 m/s 이다 (그림 1b). 그림 2a는 동해의 평균음속구조를 표준해양으로 설정한 경우의 음파 전파경로이고 그림 2b는 거리중속 음속구조를 표준해양으로 설정한 경우의 음파 전파경로이다. 거리중속 표준해양인 경우 극전선을 지나면서 음파의 전파경로가 달라지므로 도달시간에서도 차이가 있을 것이다. 표준해양에서의 전파경로와 도달시간은 OAT를 수행하기 위한 기준이 되는 것으로 전파경로의 차이가 심한 경우를 기준으로 하여 도달시간의 차이를 구한다면 음속의 변동에 의한 오차보다 전파경로의 변동에 의한 오차가 더 크게 작용할 것이다.

3. 거리중속 표준해양에서의 forward problem

거리중속 표준해양에서의 음속변동에 따른 음파 도달시간 차이(δT)는

$$\begin{aligned}\delta T &= \int_{r_1} \frac{ds}{C_0 + \delta C(r, z)} - \int_{r_0} \frac{ds}{C_0(z)} \\ &\approx - \int_{r_0} \frac{\delta C}{C_0^2} ds\end{aligned}\quad (1)$$

로 주어진다. 여기서, r_0 는 표준해양에서의 전파거리를 나타내고 r_1 는 변동해양의 전파거리를 나타내는 것으로 도달시간을 역추정하는데 오차를 포함하고 있으며 극전선과 같이 음속의 변동이 심한 경우 그 오차는 커질 수 있다. 따라서 거리중속 표준해양을 이용할 경우 도달시간의 차이는

$$\begin{aligned}\delta T &= \left(\int_{r_1} \frac{ds}{C_{01} + \delta C_{1(r, z)}} - \int_{r_{*1}} \frac{ds}{C_{01}(z)} \right) + \left(\int_{r_2} \frac{ds}{C_{02} + \delta C_{2(r, z)}} - \int_{r_{*2}} \frac{ds}{C_{02}(z)} \right) \\ &\approx - \left(\int_{r_{*1}} \frac{\delta C_1}{C_{01}^2} ds + \int_{r_{*2}} \frac{\delta C_2}{C_{02}^2} ds \right)\end{aligned}\quad (2)$$

로 된다. 여기서, r_1 , r_2 는 냉수역과 난수역에서 전파거리, r_{*1} , r_{*2} 는 냉수역과 난수역의 표준해양의 전파거리, C_{01} , C_{02} 는 각 해역의 표준해양 음속구조, δC_1 , δC_2 는 각 해역의 음속변동을 나타낸다. 음원과 수신기 사이의 여러 개의 음선중에서 i 번째의 음선이 j 번째 격자를 통과하는 거리를 R_{1ij} , R_{2ij} 라 하여, 식 (2)을 다시 쓰면

$$\delta T_i = \left(\sum_{j=1}^I G_{1ij} \delta C_{1j} + \sum_{j=1}^J G_{2ij} \delta C_{2j} \right) \quad (i=1, 2, \dots, I) \quad (3)$$

이 되는데, 여기서, $G_{1ij} = -R_{1ij}/C_{01}^2$, $G_{2ij} = -R_{2ij}/C_{02}^2$ 이고, I 와 J 는 격자와 음선의 수이다. δC_{1j} , δC_{2j} 를 구하기 위해 SVD(Singular Value Decomposition) 방법을 사용하여 도달시간 변위로부터 음속의 변동량을 구할 수가 있다.

4. 역추정 결과

그림 3과 같이 대상해역을 난수역과 냉수역으로 구분하여 전선을 주고 거리중속 표준해양을 이용한 400 m 층의 역추정 결과는 그림 4와 같다. 그림 4a는 음원과 수신기의 수가 4개 인 경우이고 그림 4b는 8개 인 경우이다. 음원과 수신기를 4개 설정한 경우는 전선의 형태를 재현하지 못하였으나 8개를 설정한 경우는 전선의 형태를 잘 재현하나 평균오차가 약 0.337 °C 정도이고 난수역은 실제보다 높고 냉수역은 실제보다 낮게 나타난다. 이러한 오차는 전파경로의 차이에 의한 것으로 이를 최소화하기 위하여 거리중속 표준해양을 사용한 경우 음원과 수신기의 수를 4개만 사용하여도 그림 5와 같은 결과를 얻을 수가 있다. 이 경우의 평균오차는 약 0.295 °C 정도를 전선의 형태를 잘 재현하며 음원과 수신기를 8개 사용한 경우보다 더 좋은 결과를 보여주고 있다.

5. 결 론

한국 동해와 같이 강한 전선이 존재하여 음속의 구조가 다른 해역에 대하여 OAT를 이용하여 해양탐사를 수행하고자 할 경우에는 거리중속 표준해양을 이용한 OAT 방법이 요구된다. 이는 OAT의 필수조건중에서 전파경로의 안정성을 만족하는 것으로 역추정 결과에서 거리비중속 표준해양을 사용한 경우보다 좋은 결과를 얻었다. 따라서 동해와 같이 음속의 해역별, 계절별 변동이 큰 해역에서는 해역을 나누고 계절별로 다른 표준해양을 적용할 경우 오차는 더 작아 질 것이다.

6. 참고문헌

- [1] J. L. Spiesberger, R. C. Spindel and K. Metzger, Stability and identification of ocean acoustic multipaths, *J. Acoust. Soc. Am.*, 67 : 2011-2017, 1980.
- [2] 한상규, 나정열, 동해 남서해역에서 해양음향 토모그래피 운용에 의한 해양탐사 가능성, 한국음향학회, 한국음향학회지, 13(6) : 75-82, 1994.
- [3] 나정열, 한상규, 동해에서 Eddy에 의한 수중신호 변형 모의, 한국음향학회 학술발표 논문집, 12(1(s)) : 195-198, 1993.
- [4] 한상규, 나정열, 이재학, 해양음향 토모그래피를 이용한 수중음속분포 역추정, 한국음향학회 학술발표 논문집, 14(1(s)) : 85 - 89, 1995.

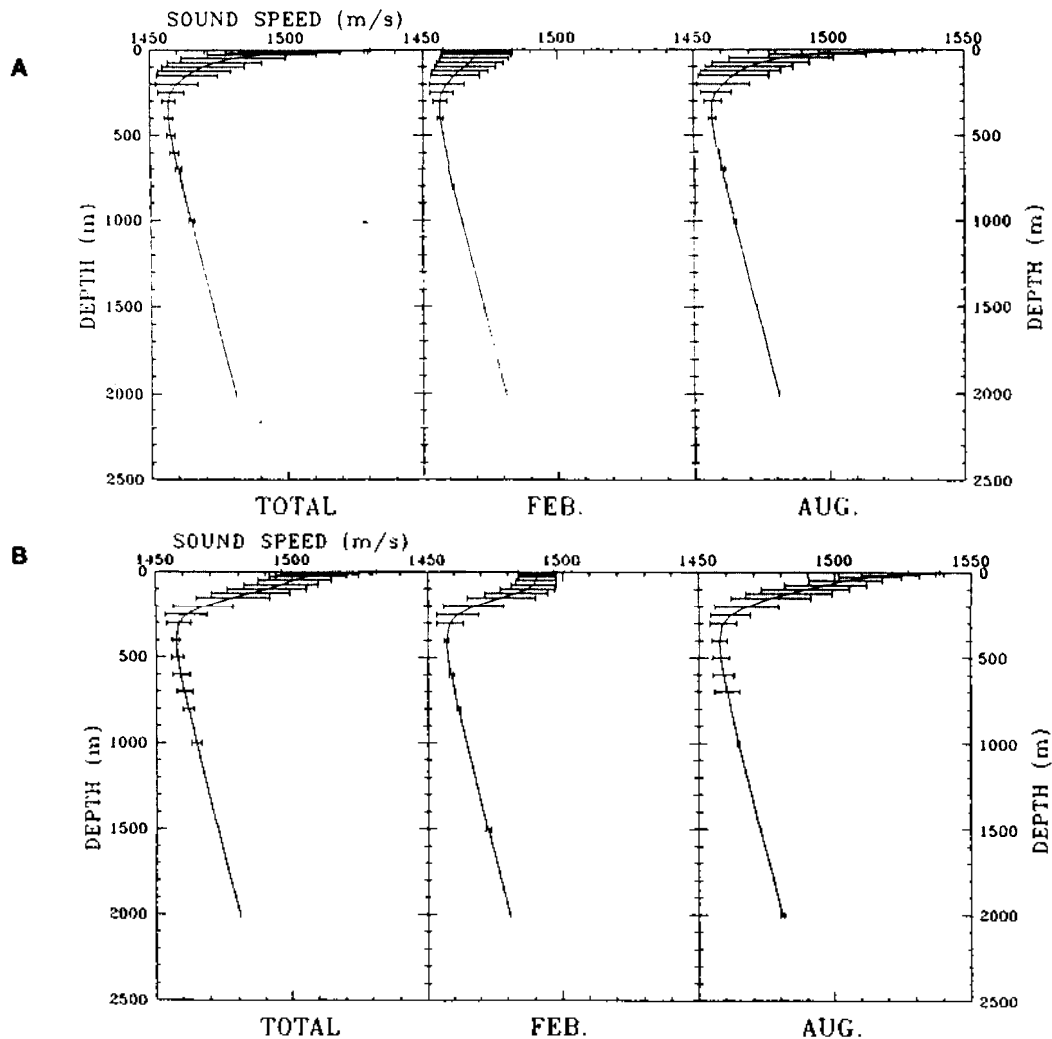
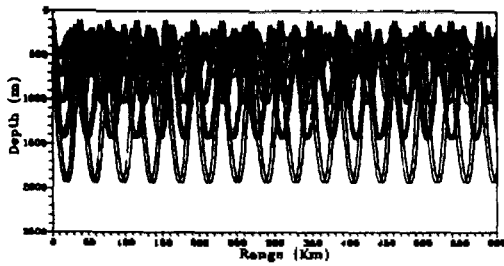


그림 1. 동해의 평균 음속구조와 표준편차. (a) 북부해역 (b) 남부해역.

A



B

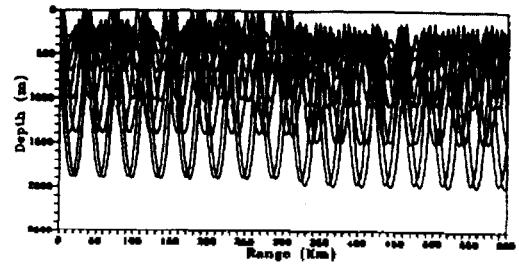


그림 2. 동해의 2월. 평균 음속구조에의 음선추적 결과 (음원수심 : 350 m).

(a) 거리비중속 표준해양인 경우 (b) 거리중속 표준해양인 경우.

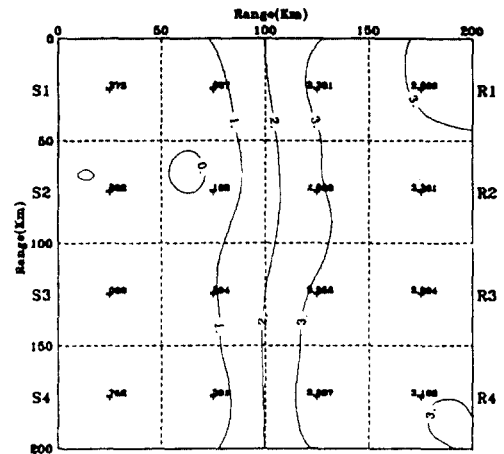
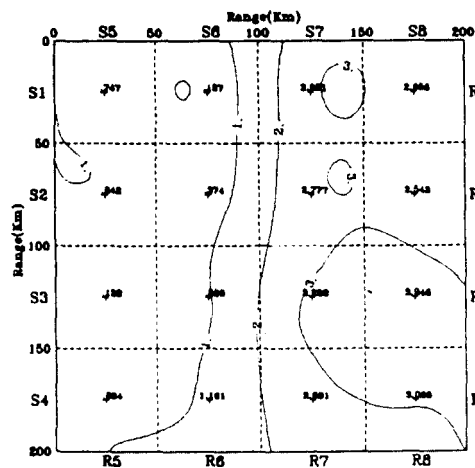


그림 3. 전선을 가정한 경우의 400 m 층 수온분포.

그림 5. 거리중속 표준해양을 사용한 경우의 400 m 층 역추정 결과

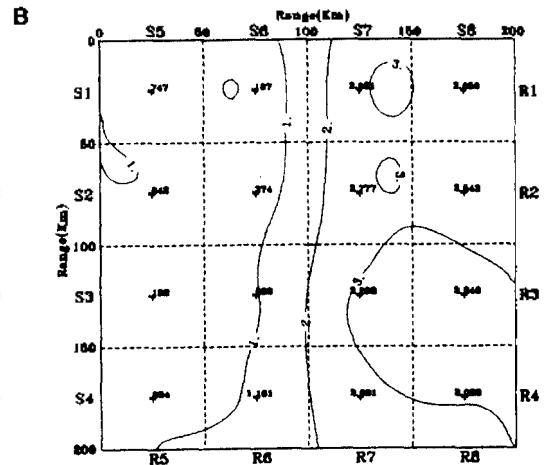
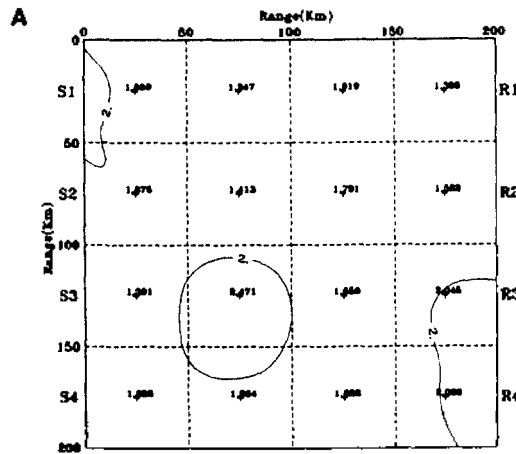


그림 4. 거리비중속 표준해양을 사용한 경우의 400 m 층 역추정 결과.

(a) 음원과 수신기가 4개인 경우 (b) 음원과 수신기가 8개인 경우.