

동해에서 EDDY에 의한 수중신호 변형 모의

나정열, 한상규^o
 한양대학교 지구해양학과

UNDERWATER SIGNAL SIMULATION DUE TO WARM EDDY IN THE EAST SEA OF KOREA

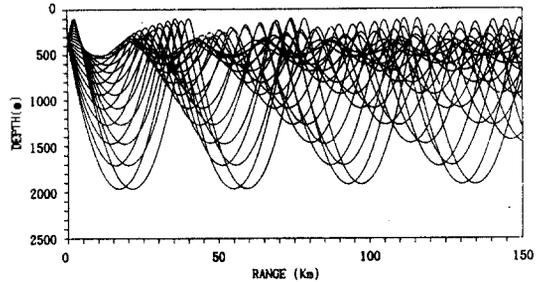
Jung-Yul NA, Sang-Kyu HAN^o
 Dept. of Earth & Marine Sciences, HAN YANG Univ.

요약문

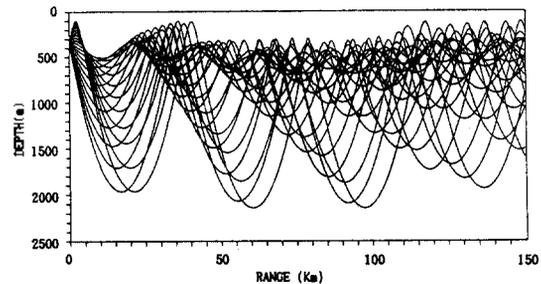
해수의 물리적 성질 변화에 의한 수중음속 변화는 수중음파 전파에 커다란 영향을 미친다. 매질변동에 의한 음파 전파경로 변동특성, 즉 음파 도달시간 변동에 의한 매질변위량 추정으로부터 해양을 탐사하는 "해양음향 토모그래피"를 운용하기 위하여 비균질 매질에서의 음파 전파경로 파악이 우선이다. 수심이 일정한 비균질한 매질에서의 음파 전파경로를 파악하기 위해 파동방정식의 해를 Ray theory에 의거 ray path를 구하고 송,수신기 사이를 연결하는 eigenray 정보를 얻었다. 음원의 주파수가 400Hz(± 25 Hz), pulse length가 20ms인 LFM pulse를 사용하였다. 이 음원을 동해의 최소음속층에서 송,수신하였을 경우 음원에서 150Km 떨어진 수신기에 도달한 신호는 평균음속분포 일때 보다 약 86ms 정도 빨리 도착한다. 또한 Eigenray 정보에 의거 모의된 수신신호는 토모그래피 운용을 위한 필수 조건인 ray path의 식별, 안정성, 그리고 분해능을 만족한다. 또한 모의된 수신신호 음파 도달시간 변동 분석으로 송,수신기 사이의 매질 변동을 파악 할 수 있다.

1. 서론

한국 동해 중부해역에 소위 "남수성 소용돌이"라는 warm eddy가 직경 100Km 이상, 수심 200m 이하 까지 존재한다¹. 이로 인하여 수심 200m의 수온은 수위보다 8~10°C 정도 높게 나타나며 이에 따른 음속이 30~40m/sec 증가하여 수중음향 전파에 커다란 영향을 미친다. 그 결과 warm eddy가 존재할 때 음파는 굴절되어 표층에 도달하지 못한다(Fig. 1). 이러한 해수의 물리적 성질 변동에 따른 수중음향 전파특성을 역이용하여 1979년에 Mark 와 Rumsch²가 해양음향 토모그래피(Ocean Acoustic Tomography, OAT)를 이용한 대규모 해양탐사 방법을 제안하였다. 즉, 수천 Km 떨어진 송신기와 수신기 사이의 전파매질의 변동에 의한 음파 도달시간 변동을 관측하여 그 변위와 매질의 시,공간적 변화를 역방향(Inverse



(a) Mean sound speed profile.



(b) Perturbed sound speed profiles by eddy.

Fig. 1. Ray tracing.

problem)으로 파악한다. 최근에는 장기적이고 대규모적인 해양관측 뿐만 아니라 단기적이고 중규모적인 관측에도 응용되고 있다^{3,4}.

해양음향 토모그래피 운용을 위해서는 매질의 변동에 따른 음파 전파경로를 파악하는 forward problem이 선행되어야 하며⁵, 또한 수신신호는 ray path의 "식별(identification)", "안정성(stability)", 그리고 "분해능(resolution)"을 만족해야 한다⁶. 즉, 비균질 매질에 대한 수치모델로 음파 전파경도를 파악하여야 한다. 또한 수신신호는 신호대 잡음비를 최대화 하여야 하고 각각의 수신신호는 구분이 되어야 하며 도달시간 차이에 따른 음파의 전파경로 추정이 가능하여야 한다.

본 연구에서는 동해에 OAT를 운용하기 위하여 수심이 일정하고 음속이 거리와 수심에 따라 변하는 비균질 매질에서의 파동방정식을 ray theory 방법으로 유도하여 매질변동에 따른 음파 전파경로를 파악하고, 송, 수신기 사이의 eigenray 정보에 의거 eddy에 의한 음속의 변화가 있을 경우의 수신신호를 모의하였으며 이를 근거로 수신신호에 의한 eigenray 정보를 역추정하였다.

2. RAY PATH EQUATION

음속이 수심과 거리에 따라 변할 때 음압이 $P(r, z)$ 일 때 파동방정식은

$$\nabla^2 p = \frac{1}{C^2(\vec{r})} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

이고, $P(\vec{r}, t) = A(\vec{r}, t) \exp(i(\vec{k}(\vec{r}) \cdot \vec{r} - \omega t))$ 라 가정하고 ray theory 조건에 의거 유도한 eikonal 방정식으로 부터 ray path equation을 원통좌표계 (r, φ, z) 에서 구하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) - nr \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 = \frac{\partial n}{\partial r} = n_r \quad (2)$$

$$\frac{d}{ds} \left(nr^2 \frac{d\varphi}{ds} \right) = \frac{\partial n}{\partial \varphi} \quad (3)$$

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dz}{ds} \right) = \frac{\partial n}{\partial z} = n_z \quad (4)$$

where, $n = C_0 / C(r, z)$

이를 정리하면

$$\frac{dz}{dr} \cos \theta \frac{d}{dr} (n \cos \theta) + n \cos^2 \theta \frac{d^2 \theta}{dr^2} = n_r \quad (5)$$

$$\cos \theta \frac{d}{dr} (n \cos \theta) = n_r \quad (6)$$

이 된다. 따라서 Ray path equation은

$$z' = [1 + (z')^2] \left[\frac{n_r}{n} - z' \frac{n_r}{n} \right] \quad (7)$$

이 된다. 또한 Ray path 수심의 입사각에 따른 변화를 구하기 위하여 Depth spreading equation을 식(7)로 부터 유도하면 다음과 같다.

$$\xi' = \left[\frac{2z'z''}{1+z'^2} - (1+z'^2) \frac{n_r}{n} \right] \xi' + \left[(1+z'^2) \left\{ \frac{n_{zz}}{n} - z' \left(\frac{n_{rz}}{n} \right) \right\} - z' \frac{n_r}{n} \right] \xi \quad (8)$$

where, $\xi = \partial z / \partial \theta$, $n_{zz} = \partial^2 n / \partial z^2$, $n_{rz} = \partial^2 n / \partial z \partial r$

전파손실 계산을 위한 한점의 intensity(I)는 면적에 비례하므로 두점 사이의 intensity ratio는

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\cos \theta_2}{(r_2 - r_1) (\partial z / \partial \theta_2) \cos \theta} = \frac{\cos \theta_2}{\Delta r (\partial r / \partial \theta_2) \sin \theta} \quad (9)$$

으로 구할 수 있다.

따라서 Ray path depth와 slope는 수치해석법을 이용하여 간단히 계산할 수 있으며, 이로부터 path length와 travel time을 구하면

$$s = \int_0^r \frac{r}{(1+z'^2)^{1/2}} dr \quad (10)$$

$$t = \frac{1}{C_0} \int_0^r n (1+z'^2)^{1/2} dr \quad (11)$$

이다.

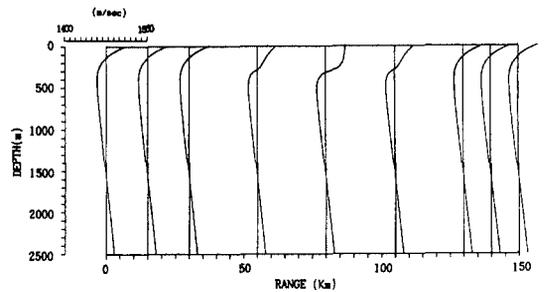


Fig. 2. Distribution of range variant sound speed profiles.

3. Eigenray 정보

송신기와 수신기를 연결하는 eigenray는 발사각(launch angle)의 변화량에 대한 수심과 거리의 변화량을 이용하여 임의의 발사각에 대한 eigenray의 위치를 내삽법에 의하여 찾아낼 수 있으며 이에 따른 도달시간(travel time), 전파거리(path length), 발사각(launch angle), 도달각(arrival angle), 음압강도(intensity) 등의 eigenray 정보를 얻을 수 있다. 각 eigenray는 음속변위에 따른 경로를 가지고 수신기에 도달하므로 수신신호를 분석하면 음파가 지나온 경로에 대한 매질의 변동을 추정할 수 있다.

동해의 매질변동에 의한 경로 파악을 위해 수심을 음파 전파경로 파악을 위해 수심을 2500m로 일정하게 가정하고 평균 음속구조와 거리 80Km에 반경 50Km인 임의의 eddy를 가정하였다. Fig. 2와 같은 음속분포가 있을 경우에 송신기와 수신기를 최소음속층인 350m, 400m에 두었을 경우 입사각이 ± 9°에 대한 음파는 eddy에 의해 다른 경로를 통해 수신기에 도달한다(Fig. 3). 이로인하여 도달시간의 변위가 발생한다. 즉, 수신기에 도달하는 eigenray 정보가 달라지게 된다. Fig. 4는 평균음속분포일 때와 eddy가 있을 때의 도달시간에 따른 음압을 나타낸 것이다. 이 음압은 음압준위(source level) 200dB에 대한 전파손실(transmission loss)과 주파수의

동해에서 EDDY에 의한 수중신호 변형 모의

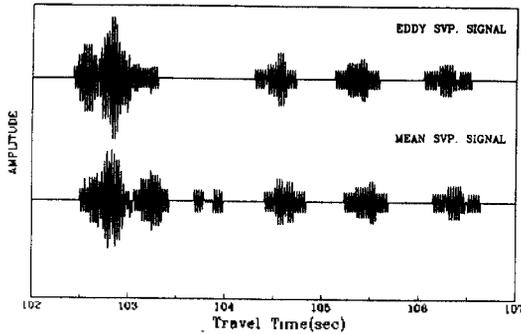
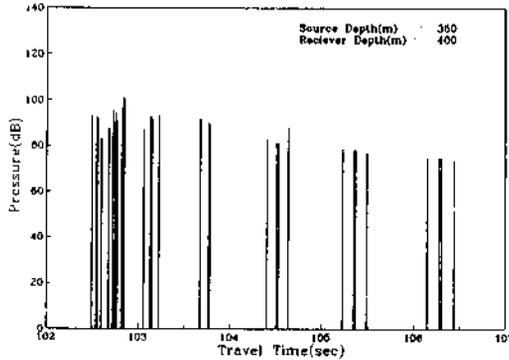
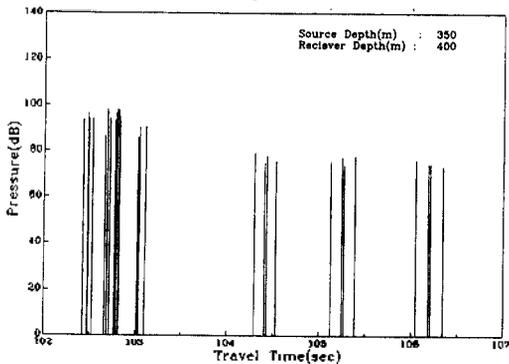


Fig. 6. Received signal simulation for source and eigenrays.



(a) Mean sound speed profile.



(b) Perturbed sound speed profiles by eddy.

Fig. 7. Eigenrays obtained by deconvolution from received signals.

음원신호 $s(t)$ 에 대하여 수신신호는 음파 도달시간에 따른 응답함수 $r(t)$ 와의 convolution으로 수신신호 $c(t)$ 를 얻을 수 있다¹⁰. Fig. 6은 수신신호를 모의한 결과이다.

이 수신신호를 분석하기 위해서는 주파수 특성에서의 수신신호 $c(f)$ 와 음원신호 $s(f)$ 의 deconvolution에 의해 응답함수를 구할 수 있다¹¹. 즉, 응답함수 $r(t)$ 는 수신신호에 의한 eigenray의 시간에 따른 음압을 나타낸다(Fig. 7). 즉 수신신호의 분석으로 eigenray 정보를 얻을 수 있으며 이로써 각 eigenray의

도달시간에 의한 음파의 전파경로 역추정을 통해 매질의 변동향을 파악 할 수 있다.

5. 결 론

동해의 eddy로 인한 수중음속 변동은 음파 전파경로에 커다란 영향을 미치며 수신기에 도달하는 음파의 도달시간 변위가 발생한다. 음속이 거리와 수심에 따라 변하는 비균질 매질에서의 음파 전파경로는 수치모델을 이용하여 파악할 수 있으며 이에 의거 eigenray 정보를 얻을 수가 있다. 이러한 eigenray 정보를 음원신호와 합성하여 수신신호를 모의하였으며 역으로 모의된 수신신호의 주파수 분석으로 eigenray 정보를 얻을 수 있다. 즉, 음파의 도달시간 변위에 의거 송,수신기 사이의 매질 변동특성을 파악할 수 있다. 또한 400Hz대역의 LFM pulse를 음원신호로 사용하였을 경우 eigenray 정보에 의거 모의된 수신신호 분석으로 음파 전파경로 "식별"이 가능하며, 전파경로에 따른 도달시간의 차이는 수신신호의 "안정성"을 만족하며 그리고 수신신호는 주변소음과의 구분이 가능하여 "분해능"을 만족한다. 본 연구에서 수심이 일정한 경우에 대하여 ray method에 근거하여 음파 전파경로를 파악하였는데 이를 보완하면 더 정확한 음파 전파경로 파악이 가능할 것이다.

6. 참고문헌

1. 김철수, "동해에서의 중규모 해양변동에 관한연구(1차년도)", 해양연구소, BSPN 00187-611-1, 1993.
2. Munk, W. H. and C. A. Wunsch, "Ocean acoustic tomography : A scheme for large scale monitoring", Deep-Sea Res., 26, 123-161, 1979.
3. Spiesberg, J. L., and K. Metzger, "Basin-scale tomography : A new tool for studying weather and climates", J. Geophys. Res., 96(C3), 4869-4889, 1991.
4. Chester, D. B., P. Malanotte-Rizzoli and H. DeFerrari, "Acoustic tomography in the Straits of Florida", J. Geophys. Res., 96(C4), 7023-7048, 1991.
5. Cornuelle, B. D., "Acoustic tomography", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-20(3), 326-332, 1982.
6. Spiesberg, J.L., R.C. Spindel and K. Metzger, "Stability and identification of ocean acoustic multipaths", J. Acoust. Soc. Am., 2011-2017, 1980.
7. Guolleng, J. and P. F. Worcester, "The feasibility of measuring ocean pH by long-range acoustics", J. Geophys. Res., 94(C4), 4749-4756, 1989.
8. Urlick, R. J., Principles of Underwater Sound., 3rd ed., McGraw-Hill, 202-236, 1983.
9. Westwood, E. K. and P. J. Vidmar, "Eigenray finding and time series simulation in a layered-bottom ocean", J. Acoust. Soc. Am., 81(4), 912-924, 1987.
10. Westwood, E. K. and C. T. Tindle, "Shallow water time-series simulation using ray theory", J. Acoust. Soc. Am., 81(6), 1725-1761, 1987.
11. Lim, J. S. and A. V. Oppenheim, Advanced topics in signal processing, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 42-50, 1988.