

동해 남서해역에서 해양음향 토모그래피 운용에 의한 해양탐사 가능성

Feasibility of Ocean Survey by using Ocean Acoustic Tomography in southwestern part of the East Sea

한 상 규*, 나 정 열*
(Sangkyu Han*, Jungyul Na*)

*이 연구는 1993년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임 (과제번호 : 93-0700-04-01-3)

요 약

해수내에서 수중음파의 전파경로 및 도달시간은 해수의 물리적 성질에 의해 커다란 영향을 받는다. 최근의 해양탐사 방법의 하나인 해양음향 토모그래피는 음원과 수신기 사이의 음파 도달시간 차이로부터 해수의 물리적 특성(주로 음속, 수온, 해류변동)을 파악하는 방법이다. 해양음향 토모그래피에 의한 해양탐사를 수행하기 위해서는 비균질 매질에서의 음파전파 모델을 이용하여 매질변동에 따른 음파의 전파경로 및 도달시간 등의 파악이 우선이다. 또한 수신신호는 음파 전파경로의 식별, 매질변동에 따른 수신신호의 안정성, 그리고 주위잡음과 음원신호를 구별하기 위한 분해능 등을 만족하여야 한다. 본 연구에서는 동해에서 해양음향 토모그래피에 의한 해양탐사의 가능성을 검토하기 위하여 기존의 관측자료로부터 표준해양을 설정하여 음파의 도달시간 및 전파경로의 기준으로 정하였다. 동해의 표준해양의 특성은 표층의 음속이 약 1523 m/s이고 최소음속층인 400 m층의 음속이 약 1458 m/s이다. 동해의 수중음속 변동은 직경 100 km 이상인 중규모 난수성 소용돌이 출현으로 인하여 매우 심한데 수심 200 m 정도까지 확장하여 존재한다. 음원과 수신기의 수심을 최소음속층보다 약간 상층인 350 m 수심에 두고 수평거리가 200 km 떨어진 표준해양과 소용돌이 음속구조에 대한 음파 전파특성을 파악하였다. 사용된 모델은 음선이론에 근거한 비균질매질에서의 음파전파 모델이며, 이를 이용하여 eigenray 정보를 산출하였으며, 중심주파수가 400 Hz, 주파수폭이 16 Hz, 펄스 길이가 64 ms인 LFM 펄스를 가진 가상적인 음원신호를 설정하여 수신신호를 모의하였다. 수신신호 모의 결과와 수치모델에 의한 동해에서의 음파 전파특성 결과는 해양음향 토모그래피 운용을 위한 필수적인 음파 전파경로의 식별, 매질변동에 따른 안정성, 그리고 주위잡음과 음원신호의 구별을 위한 분해능을 만족한다.

ABSTRACT

The ray paths and travel times of sound wave in the ocean depend on the physical properties of the propagating media. Ocean Acoustic Tomography(OAT), which is inversely estimate the travel time variations between fixed sources and receivers the physical properties of the corresponding media can be understood. To apply ocean survey technology by using the OAT, the tomographic procedure requires forward problem that variation of the travel times be identified with the variability of the medium. Also, received signals must be satisfied the necessary conditions of ray path stability, identification and resolution in order for OAT to work. The canonical ocean has been determined based on the historical data and its travel time and ray path are used as reference values. The sound

*한양대학교 지구해양과학과
접수일자: 1994년 7월 29일

speed of canonical ocean in the East Sea is about 1523 m/s at the surface and 1458 m/s at the sound channel axis (400 m). Sound speeds in the East Sea are perturbed by warm eddy whose horizontal extension is more than 100 km with deeper than 200 m in depth scale. In this study, an acoustic source and receiver are placed at the depth above the sound channel axis, 350 m, and are separated by 200 km range. Ray paths are identified by the ray theory method in a range dependent medium whose sound speeds are functions of a range and depth. The eigenray information obtained from interpolation between the rays bracketing the receiver are used to simulate the received signal by convolution of source signal with the eigenray informations. The source signal is taken as a 400 Hz rectangular pulse signal, bandwidth is 16 Hz and pulse length is 64 ms. According to the analysis of the received signal and identified ray path by using numerical model of underwater sound propagation, simulated signals satisfy the necessary conditions of OAT, applied in the East Sea.

I. 서 론

해수내에서 수중음파는 해수의 물리적 성질(수온, 염분, 압력)의 변화에 의해 커다란 영향을 받는다. 즉, 매질의 변화는 수중음속의 변화를 야기시키고 이로 인해 음파의 전파경로 및 도달시간이 달라지게 된다. 이러한 매질의 변동과 수중음파의 특성변화를 이용하여 해수의 물리적 특성을 파악하는 해양탐사 방법이 해양음향 토모그래피(Ocean Acoustic Tomography, OAT)이다. Munk의 Wunsch¹가 음원과 수신기가 수천 km 떨어진 대양에서 음파의 도달시간 차이를 측정하여 해수의 물리적 특성변화를 추정하는 OAT를 제안한 이후 많은 실험과 이론의 적용으로 해양탐사의 커다란 발전을 이룩하였다. 초기에는 대양적 규모에 적용하여 표준해양(canonical ocean)과의 수온변동을 파악하였는데, 최근에는 대양 뿐만 아니라 중규모 해양(수백 km)에서의 적용도 가능하며^{2,3} 음원과 수신기의 쌍방향 전파로 유속변동 관측도 가능하다^{3,4}. 또한 지구온난화 현상 및 해수유동 파악에도 적용하고 있으며^{5,6} 움직이는 배에 음원과 수신기를 설치하여 특정 해역을 탐사하는 moving ship tomography 방법도 적용하고 있다⁷.

OAT를 운용하기 위해서는 대상해역에 대한 표준해양 설정이 필요하며 이 표준해양으로부터 매질변동에 따른 음파의 전파경로 및 도달시간의 변위를 파악하기 위한 forward problem의 해결이 선행되어야 한다. 초기의 forward problem 해결방법은 ray 이론에 근거한 해를 구하는 ray 토모그래피였는데 최근에는 wave method에 의한 mode 정보로부터 해를 구하는 modal 토모그래피의 적용에 의한 방법도 제시되고 있다^{8,9,10}. 이러한 음파 전파모델에 의거한 매

질변동에 따른 음파의 전파경로 파악을 통하여 수신 신호의 도달시간 차이에 따른 매질의 변동을 역추정하는 inverse problem이 해결되어야 한다. 이러한 해결을 위해 OAT는 ①수신신호의 전파경로를 추정할 수 있는 식별능력(ray path identification), ②매질의 변화에 따른 전파경로의 안정성(stability), ③주위잡음과 음원신호를 구별하기 위한 분해능(resolution)의 3가지 조건을 만족해야만 운용이 가능하다¹¹. 따라서 OAT에 의한 해양탐사를 수행하기 위하여 음속이 수심과 거리에 따라 변하는 비균질매질에서의 음파 전파모델을 이용한 음파 전파경로 및 도달시간을 파악하여야 한다. 이를 근거로 각각의 수신신호 피크(peak)는 구분이 되어야 하며 도달시간 차이에 따른 음파의 전파경로 추정이 가능하여야 하고 신호대 잡음비를 향상시키기 위한 음원신호의 설정이 필요하다.

동해에서 OAT를 운용한 해양탐사는 전혀 없는 실정이지만, 팽¹²은 기존 관측자료를 분석하여 동해 남서해역에 대한 표준해양을 설정하고 균질매질에서의 음파 전파모델을 이용하여 매질에 따른 음파의 도달시간 및 전파경로를 파악한바 있다. 나와 한¹³은 비균질매질에서의 모델을 이용하여 최소음속층에 위치한 음원과 수신기 사이의 매질을 통과한 수중음파의 전파특성을 파악하고 주위잡음의 영향을 고려하지 않은 경우의 수신신호를 모의하여 OAT 적용에 대한 가능성을 시도하였다. 또한 Akulichev와 Solovyov¹⁴는 동해의 블라디보스톡과 동해 남부해역을 연결하는 남북단면(131°E)의 기존 관측자료를 이용하여 지구온난화 전후의 음파 전파경로 및 수신신호의 도달시간 차이를 파악하였다.

OAT에 의한 해양탐사는 현장실험을 통한 수신신호의 분석에 의한 접근이 바람직하나 여러가지 여건

상 동해에서의 실험이 어려운 실정이다. 본 연구에서는 한국 동해에서 OAT 운용에 의한 해양탐사의 가능성을 검토하기 위하여 기존관측자료를 분석하여 표준해양을 설정하였다. 이러한 표준해양을 기준으로 하여 매질의 변동이 있는 경우의 음파의 도달시간과 전파경로를 수치모델로 파악하여 수신신호를 모의하고 OAT의 3대 조건을 만족하는가를 파악하였다.

II. 표준해양 설정

해양에서 음파 전파모델을 이용하여 매질의 변동에 따른 음파 전파특성의 변화를 파악하기 위하여 수중음속의 기준이 필요하다. 이러한 기준은 Munk¹⁵의 표준해양으로 가능하며 지형류나 내부파, 열전선, 중·소규모 소용돌이(eddy) 등으로 인한 perturbed ocean¹⁶ 즉, 매질의 변동이 발생한 경우에 표준해양과의 음파의 전파경로 및 도달시간의 차이를 파악할 수 있다. 동해의 남서해역은 동한난류의 북상과 북한한류수의 남하로 인하여 복잡한 해수순환이 일어나는 해역으로 수중음속의 시공간적인 변화가 매우 심한 곳이다. 특히 난수괴 혹은 난수성 소용돌이라는 warm eddy가 직경 100 km 이상, 수심 200 m 이하까지 확장하여 존재한다^{17, 18}. 이로 인하여 수심 200 m에서의 수온은 주위보다 약 4~5 °C 높으며 음속은 약 15~20 m/s 정도 증가한다. 이와 같이 수중음속의 시공간적인 변화가 심한 해역에 적합한 표준해양을 설정하고자 장기간 관측자료를 평균하여 표준해양을 설정하였다.

수중음속은 국립수산진흥원에서 2개월 간격으로 정선관측한 1963~1990년까지의 수심별 수온, 염분 자료로부터 계산하였다. 국립수산진흥원의 정선관측은 약 500 m까지 관측하지만 그 이심에서 수온과 염분의 변화는 거의 없으므로 수중음속은 수심에 의한 영향만을 고려하여 계산할 수 있다. 본 연구는 동해 남서해역에서 OAT 운용을 위한 것으로 국립수산진흥원 정선 102~106, 정점 7~11까지의 수심이 2000 m 이상인 외해역을 대상으로 하여 표준해양을 파악하였다.

표준해양의 음속구조는 표층에서 약 1523 m/s, 최소음속층은 400 m에서 나타나며 음속은 약 1458 m/s 정도이며 최소음속층 이심에서는 수심의 영향으로 증가한다(Fig. 1). 수중음속의 표준편차는 표층에서 가장 큰 약 24 m/s 정도이며 수심에 따라 감소하여 최소음속층 이심에서는 거의 변화가 없다. 이러한 표

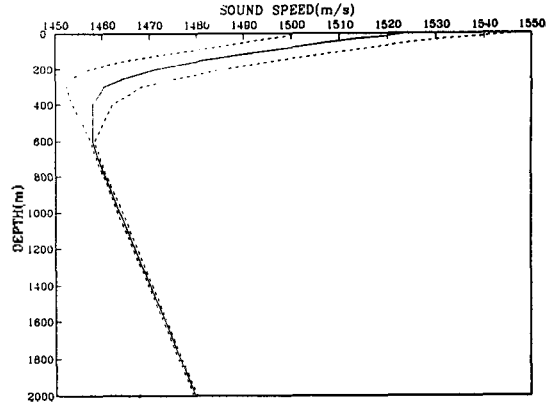


Fig 1. Sound speed profile and standard deviation of canonical ocean by using historical observed data for 28 years(1963~1990).

준해양은 수중음속의 전파의 기준이 되며 소용돌이와 같은 perturbed ocean이 존재할 경우 음파의 전파경로 및 도달시간은 표준해양과 변위를 발생한다. 따라서 표준해양과 perturbed ocean의 도달시간 차이 관측으로 음파가 통과한 매질의 수중음속 변위 파악이 가능하다.

III. Eigenray 정보

입의 음원과 수신기가 배치되었을 경우 음원에서 방사된 음파의 음선(ray)중 수신기에 도달하는 음선을 eigenray라 한다. 이러한 eigenray 정보에는 발사각(launching angle), 도달각(arrival angle), 도달시간(arrival time), 전파거리(path length), 음압 레벨(sound pressure level) 등이 있으며, eigenray 정보의 파악을 위해서는 forward problem의 해결이 선행되어야 하는데 이는 비균질매질에서의 수중음파 전파모델로써 가능하다. 비균질매질에서의 음선 이론에 의한 eigenray의 파악은 음원에서 방사된 음선중에서 수신기를 지나는 음선을 찾아내는 것으로 음선 이론 자체가 음원과 수신기 사이의 매질에 따른 음선을 추적하는 것으로 매우 유용한 방법이다. 입의 수평거리에 위치한 수신기에 도달하는 eigenray의 결정은 등간격 발사각에 대한 음선 도달수심을 파악하여 내삽법으로 수신기 수심을 통과하는 음선을 찾아 이로부터 eigenray의 발사각을 결정한다^{19, 20}. eigenray의 발사각이 결정되면 이에 따른 도달각, 도달시

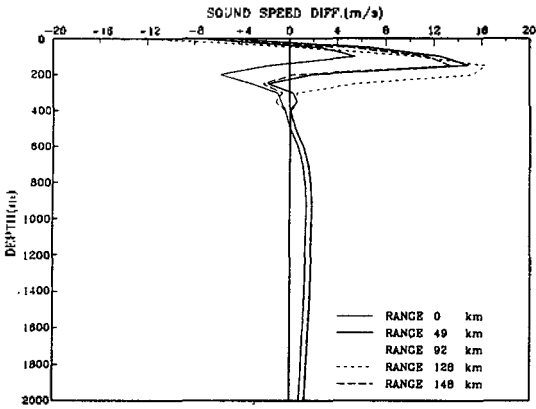


Fig 2. Sound speed difference at warm eddy from canonical sound speed.

간, 전파거리, 음압레벨 등의 eigenray 정보를 파악할 수 있다.

Fig. 2는 소용돌이가 출현한 1993년 4월에 관측한¹⁸ 수중음속의 표준해양과의 차이를 나타낸다. 표층에서는 표준해양보다 감소하지만 30~400 m 층에서는 증가하며 수심 200 m 층에서 가장 많이 증가한다. 즉, 소용돌이 중심축의 200 m 층에서는 약 16 m/s 정도 증가한다. 또한 거리에 따른 음속의 수직분포를 볼 때 소용돌이의 중심은 음원으로부터 약 128 km 떨어진 거리에 있으며 표시가 있는 음속구조는 관측한 결과이며 실선만으로 나타낸 음속구조는 spline 내삽법을 사용한 결과이다(Fig. 3).

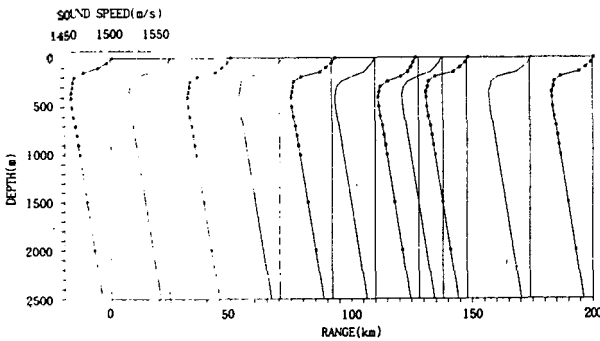
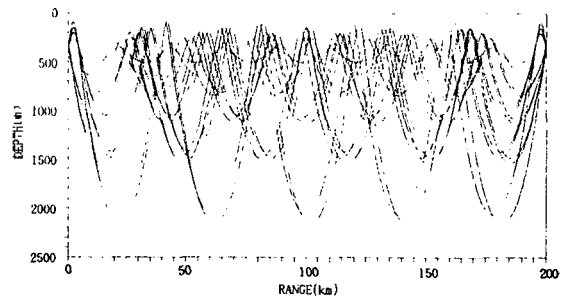
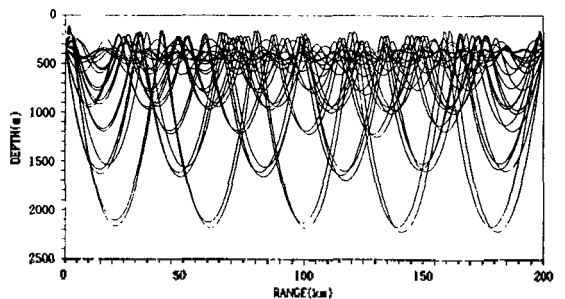


Fig 3. Distribution of range variant sound speed profiles (marked line : observed sound speed, solid line : interpolated sound speed).

음원과 수신기는 200 km 떨어진 거리에 두었으며 수심은 2500 m로 일정하게 가정하였다. 또한 음원과 수신기의 최소음속층보다 약간 위인 350 m에 두어 음파가 잘 전파되도록 하였다. 음원에서 음파는 소용돌이가 존재할 경우 표준해양의 경우와는 다른 경로를 통하여 수신기에 도달하게 될 것이다. Fig. 4는 음원에서 방사된 음선중에서 수신기에 도달하는 음선 즉, eigenray를 나타낸 것이다. 이러한 eigenray 추적 결과는 매질의 변동에 따른 음파의 전파경로를 잘 보여준다. 또한 매질의 변동에 의하여 거리에 따른 음파의 전파손실도 변하는데 소용돌이에 의한 표층(300~400 m) 음속의 증가로 인하여 표준해양보다 거리에 따른 전파손실이 증가한다. 특히 소용돌이 중심축이 있는 128 km 부근에서 전파손실이 급격히 증가하여 약 20 dB 정도 증가함을 보인다(Fig. 5). 이는 소용돌이로 인한 음속의 증가로 인해 음파가 굴절하여 표층으로 도달하지 못하였기 때문으로 수신기의 수심을 표층에 두었다면 음압레벨의 차이는 더 크게 발생할 것이다.

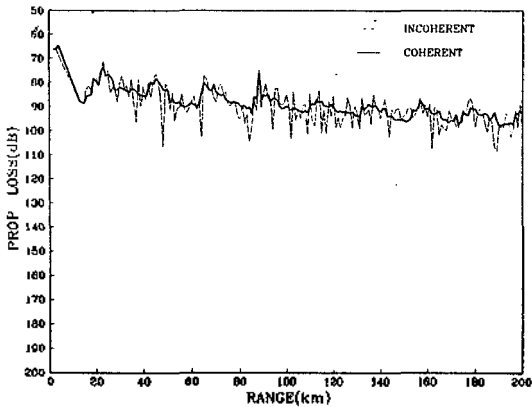


a) In case of canonical ocean

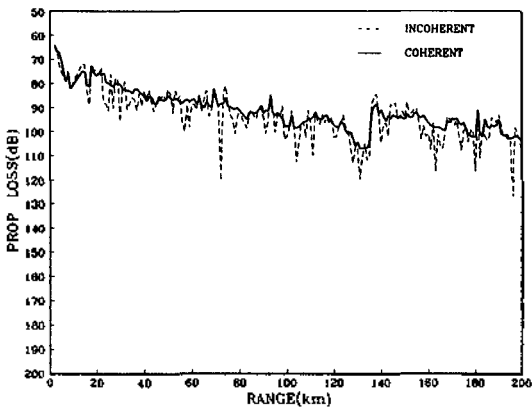


b) In case of perturbed ocean

Fig 4. Eigenray tracing for a 200-km range, using the canonical and perturbed sound speed profiles. The source and receiver is at 350 m depth.



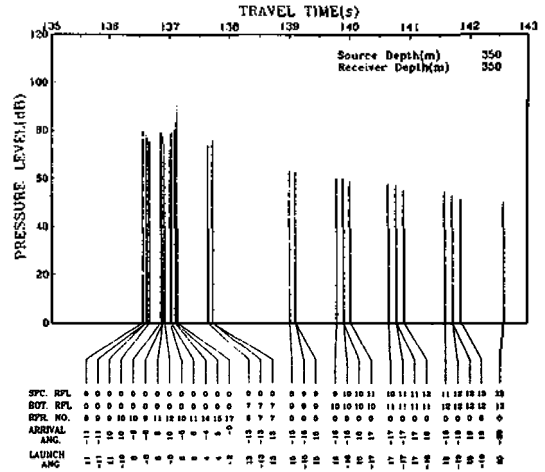
a) In case of canonical ocean



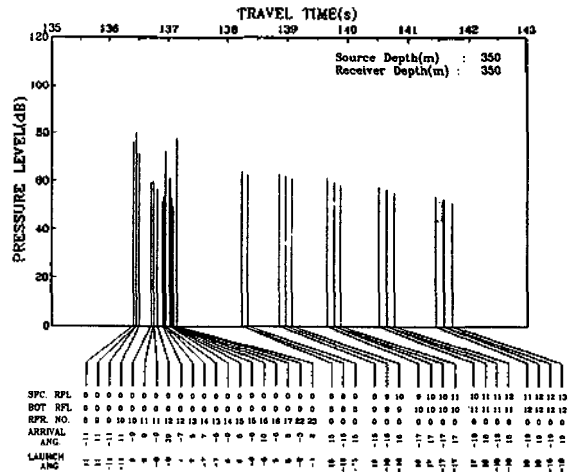
b) In case of perturbed ocean

Fig 5. Propagation loss versus range for a source and receiver depth of 350 m, and a frequency of 400 Hz.

Fig. 6은 음원과 수신기를 350 m 수심에 두고, 음원의 음압레벨이 186 dB일 경우 표준해양과 소용돌이 음속구조에 대한 eigenray 정보를 나타낸 것이다. 그림에서 수평축은 도달시간을 나타내며 수직축은 구형분산손실, 해저면과 해표면에서의 손실을 고려한 수신기의 음압레벨을 의미하며, 각각의 eigenray에 대한 발사각, 도달각, 해저면과 해표면에서의 음파 반사수와 굴절수를 표시하였다. 표준해양일 때보다 소용돌이가 존재할 경우 도달시간이 빨라지며 수신기에 도달하는 eigenray 수는 많으나 음압레벨은 작게 나타난다. 각각의 eigenray 정보는 비균질매질에서의 전파모델로 계산한 것으로 이러한 정보는 OAT 실험에 의한 수신신호의 재구성 결과와 일치할 것이



a) In case of canonical ocean



b) In case of perturbed ocean

Fig 6. Predicted travel times and ray identification.

다. 따라서 수치모델로 매질변동의 특성을 지니고 수신기에 도달하는 각 음선의 식별이 가능할 것이며 매질의 변동이 있더라도 수신신호는 도달시간의 변위만 발생하고 수신기에 도달 할 것이다.

IV. 수신신호 모의

음원과 수신기를 해양에 배치할 경우 음원으로부터 방사된 음파는 매질의 물리적 특성을 지니고 수신기에 도달하게 된다. 수신신호는 음원신호의 특성에

따라 전파에 영향을 받을 뿐만 아니라 매질의 물리적 특성에 따라 전파경로 및 도달시간이 달라지게 된다. 일반적으로 음원의 중심주파수는 음파의 전파거리와 관계가 있으며 주파수가 높을수록 해수내에서 흡수 손실이 증가하므로 멀리까지 전파되지 못한다. 또한 CW(Continuous Wave) 신호를 사용하지 않고 LFM (Linear Frequency Modulated) 펄스를 사용하는데 이는 주위잡음과 음원신호를 구분하기 위한 것이며 펄스 길이(pulse length)는 수신기에 도달하는 수신 신호 피크의 중첩을 방지하기 위한 것이다. 이러한 특성을 고려하여 아래와 같이 음원신호 $s(t)$ 를 설정 하였다.

$$s(t) = \sin [2\pi f_0 t + \beta t^2] \quad (1)$$

여기서 t = 시간

f_0 = 중심주파수

β = 밴드폭 \times pulse 길이

본 연구에서 설정한 음원신호의 중심주파수는 400 Hz, 밴드폭은 16 Hz, 펄스길이는 64 ms인 LFM 펄스를 가정하였다. 음원신호의 스펙트럼 특성은 Fig. 7과 같다.

음원신호가 주어지고 수치모델에 의해서 음파의 도달시간과 음압이 주어지면 수신신호는 시간영역에서의 콘볼루션(convolution) 방법과 주파수영역에서의 FFT 방법으로 모의할 수가 있다^{20, 21}. 주위잡음의 영향을 고려하지 않은 경우 시간영역에서의 콘볼루션 방법에 의한 수신신호 $c(t)$ 는

$$c(t) = r(t) * s(t) \quad (2)$$

여기서 $r(t)$ = 응답함수

$s(t)$ = 음원신호

$*$ = convolution

로 모의할 수 있으며, 응답함수는 음파의 도달시간과 음압레벨을 나타낸다. 또한 주위잡음 $n(t)$ 를 고려하면²

$$c(t) = r(t) * s(t) + n(t) \quad (3)$$

로 수신신호를 모의 가능하다.

음원신호와 eigenray 정보에 의한 수신신호를 모의하기 위하여 신호대잡음비(Signal-to-noise ratio,

SNR)를 최대화할 수 있는 음원신호의 방식을 가정 하였다. 즉 중심주파수는 8개의 주기를 위상변조한 것으로 511개의 시퀀스(sequence)를 이용하여 한 주기가 $511(8/400) \approx 10.2$ s 되게 하였다. 또한 음원신호는 위상변조된 10.2 s 주기의 신호를 24번 반복하여 얻은 것으로 길이가 $24 \times 10.2 \approx 245$ s이다. 따라서 SNR은 펄스 압축(pulse compression)에 의해 $10 \log_{10}(511) = 27$ dB, coherent 평균에 의해 $10 \log_{10}(24) = 13.8$ dB가 증가한다^{11, 23}. 또한 해표면에서의 바람과 파도에 의해 형성된 400 Hz 대역의 주위잡음은 약 30~80 dB/Hz 정도이며²⁴, 70 dB/Hz를 가정하였다. 수평거리 200 km에 대한 전파손실은 약 106 dB, 흡수 손실은 약 4 dB 정도이며 해저면에서의 반사손실은 $-3 \times 15 = -45$ dB 이다. 따라서 수신기에서의 SNR은 해저면손실이 없는 경우에 약 49.8 dB, 해저면반사를 통하여 수신기에 도달한 경우에도 약 4.8 dB로 주위잡음에 의한 영향을 고려한 수신신호로부터 음원신호의 식별이 가능하다(Table 1).

Table 1. Signal-to-noise ratio(SNR) in dB for an internally reflected acoustic ray.

Estimated source level re: 1 μ Pa at 1 m	+ 186	
Signal processing gain (pulse compression and coherent averaging)	+ 40.8	
Estimated noise level	- 70	
	<hr/>	
	+ 159.8	
<i>In situ</i> absorption	- 4	-4
Spherical spreading loss	- 106	-106
Bottom reflection loss		$-3 \times 15 = -45$
	<hr/>	
SNR at receiver	+ 49.8	+4.8

수신신호는 음원신호 특성과 Fig. 6의 eigenray 정보를 이용하여 모의하였다. Fig. 8에 나타난 수신신호 형태에서 주위잡음은 랜덤(random) 잡음발생기에 의한 주위잡음을 고려한 것이다. 각 음선의 도달시간에서 피크가 나타나며 각각 음선의 도달시간이 펄스 길이보다 큰 차이를 가지고 수신기에 도달하면 신호의 분해능을 만족하지만, 짧은 경우는 피크가 중첩되어 음압은 증폭되어 나타나지만 분해능을 만족하지는 못한다. 이러한 수신신호모의는 OAT 실험결과를 예측하는 것으로 실제 실험에서 수신한 수신신호를 재구성하여 매질변동에 따른 음파의 도달시간의 변동을 파악하는데 유용한 기초자료가 될 것이다.

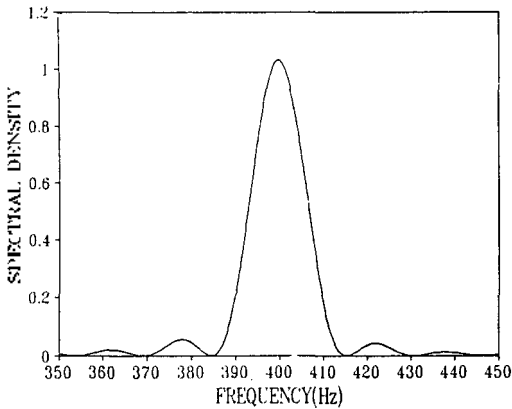


Fig 7. Power spectrum of source signal(center frequency : 400 Hz, band width : 16 Hz, pulse length : 64 ms).

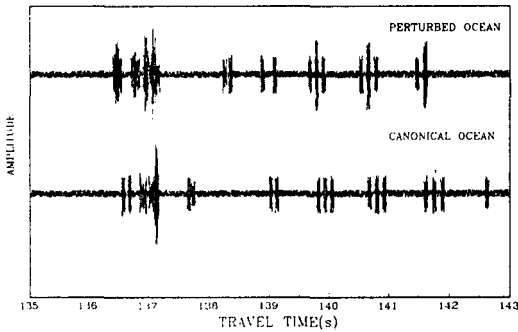


Fig 8. Simulated signal waveforms by convolution with source signal and predicted eigenray informations.

V. 결 론

본 연구는 해양음향 토모그래피를 이용하여 동해 남서해역에서 해양탐사를 하기 위한 가능성을 타진하기 위한 것이다. 이를 위해서 동해의 기존 관측 자료를 분석하여 표준해양을 설정하였다. 동해 남서해역에 대한 표준해양의 음속은 표층에서 약 1523 m/s, 최소음속층인 400 m에서 약 1458 m/s이다. 이 표준해양의 음파 전파특성은 매질의 변동에 따른 음파의 도달시간 및 전파경로의 변동량을 파악하는 기준이 된다. 매질변동에 따른 음파의 전파특성 변동을 파악하기 위하여 음선이론에 근거한 비균질매질에서의 음파전파 모델을 이용하여 eigenray 정보를 산출하여

수신신호를 모의하였다. 표준해양일 경우와 소용돌이에 의한 매질의 변동이 있을 경우의 eigenray 정보는 음파가 통과한 매질의 특성을 잘 반영한다. 또한 중심주파수가 400 Hz인 LFM 펄스를 음원신호로 가정하여 eigenray 정보와 합성하여 수신신호를 모의하였다. 이러한 수신신호 모의는 실제 현장실험에서의 수신신호를 예측하는 것으로 OAT의 가능성을 검토하기 위한 좋은 결과라 볼 수 있다.

본 연구의 결과를 종합하면 동해에서 OAT 운용에 의한 해양탐사를 수행함에 있어 OAT의 필수조건인 수중음과 전파경로의 식별은 비균질매질에서의 음파전파 모델로써 가능하며, 매질변동에 따른 수신신호는 안정성을 만족하며, 주위잡음을 고려한 수신신호는 신호대 잡음비를 향상하기 위한 음원신호의 설정으로 만족함을 보인다. 따라서 수신신호를 재구성하기 위한 역문제를 해결한다면 동해에서의 OAT에 의한 해양탐사는 매우 유용한 결과를 제공하리라 생각된다. 동해는 중규모 소용돌이의 출현과 같은 복잡한 해양특성을 가지고 있으므로 수중음속(수온, 염분)의 시공간적인 변동 파악은 동해의 해양연구 및 해수순환 연구에 중요한 결과를 제공할 것이다.

참 고 문 헌

1. W. H. Munk and C. A. Wunsch, Ocean acoustic tomography : A scheme for large scale monitoring, *Deep-Sea Res.*, 26 : 123-161, 1979.
2. D. R. Palmer, L. M. Lawson, D. A. Seem and Y. H. Daneshzadeh, Ray path identification and acoustic tomography in the Straits of Florida, *J. Geophys. Res.*, 90(C3) : 4977-4989, 1985.
3. B. M. Howe, P. F. Worcester and R. C. Spindel, Ocean acoustic tomography : Mesoscale velocity, *J. Geophys. Res.*, 92(C4) : 3785-3805, 1987.
4. P. F. Worcester, R. C. Spindel and B. M. Howe, Reciprocal acoustic transmissions : Instrumentation for mesoscale monitoring of ocean currents, *IEEE J. Ocean. Eng.*, OE-10 : 123-137, 1985.
5. P. F. Worcester, B. D. Cornuelle and R. C. Spindel, A review of ocean acoustic tomography : 1987-1990, *Rev. Geophys., Supplement* : 557-570, 1991.
6. J. L. Spiesberger and K. Metzger, Basin-scale tomography : A new tool for studying weather and climate, *J. Geophys. Res.*, 96(C3) : 4869-4889, 1991.

7. B. D. Cornuelle, W. H. Munk and P. F. Worcester, Ocean acoustic tomography from ships, *J. Geophys. Res.*, 94(C5) : 6232-6250, 1989.
8. W. H. Munk and C. A. Wunsch, Ocean acoustic tomography : Rays and modes, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 21(4) : 777-793, 1983.
9. E. C. Shang, Ocean acoustic tomography based on adiabatic mode theory, *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(4) : 1531-1537, 1989.
10. R. M. Jones, E. C. Shang and T. M. Georges, Nonperturbative modal tomography inversion. Part I. Theory, *J. Acoust. Soc. Am.*, 94(4) : 2296-2302, 1993.
11. J. L. Spiesberger, R. C. Spindel and K. Metzger, Stability and identification of ocean acoustic multipaths, *J. Acoust. Soc. Am.*, 67 : 2001-2017, 1980.
12. 팽동국, 한국 동해에 출현하는 Eddy 내의 수중음향 특성, 석사학위 논문, 한양대학교 지구해양학과, pp. 80, 1993.
13. 나정열, 한상규, 동해에서 Eddy에 의한 수중신호 변형 모의, 한국음향학회, 한국음향학회 학술발표 논문집, 12(1(s)) : 195-198, 1993.
14. V. A. Akulichev and A. A. Solovyov, Acoustic thermometry in the North Pacific Ocean and in the Sea of Japan, Second International Meeting of Global Acoustic Monitoring in the Ocean, June 20-22, 1993, Brest, France, 1993.
15. W. H. Munk, Sound channel in an exponentially stratified ocean, with application to SOFAR, *J. Acoust. Soc. Am.*, 55 : 220-226, 1974.
16. P. D. Scully-Power, Insights on marine acoustics conceived from space(IMACS), COMPUTATIONAL ACOUSTICS WAVE PROPAGATION, Vol. 1 Wave propagation, D. Lee, R. L. Sternberg and M. H. Schultz, ed., Elsevier Science Publishers, NORTH-HOLLAND, 3-15, 1985.
17. J. Y. Na, Wind stress distribution and its application to the upper-layer structure in the East Sea of Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 23(3) : 97-109, 1988.
18. 김철수, 동해에서의 중규모 해황변동에 관한연구(1차년도), 한국해양연구소, 한국해양연구소 연구보고서 BSPN 00187-611-1, pp. 84, 1993.
19. T. L. Foreman, Ray modeling methods for range dependent ocean environments, ARL Tech. Rep No. ARL-TR-83-41. Applied Research Laboratories, The University of Texas at Austin, pp. 100, 1983.
20. E. K. Westwood and P. J. Vidmar, Eigenray finding and time series simulation in a layered-bottom ocean, *J. Acoust. Soc. Am.*, 81(4) : 912-924, 1987.
21. E. K. Westwood and T. Tindle, Shallow water timeseries simulation using ray theory, *J. Acoust. Soc. Am.*, 81(6) : 1752-1763, 1987.
22. P. Cobo-Parra and C. Ranz-Guerra, Deconvolution applied to high-frequency echograms in sea bottoms, *J. Acoust. Soc. Am.*, 87(2) : 662-667, 1989.
23. J. L. Spiesberger, P. J. Bushong, K. Metzger and T. G. Birdsall, Basin-scale tomography : Synoptic measurements of a 4000-km length section in the Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, 19 : 1073-1090, 1989.
24. C. S. Clay and H. Medwin, Acoustic oceanography : Principles and applications, Wiley, New York, pp. 544, 1977.

▲한 상 규(Sangkyu Han) 1965년 8월 27일생

1988년 2월 : 한양대학교 지구해양학과 졸업(이학사)

1990년 2월 : 한양대학교 대학원 지구해양학과 이학석사

1990년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 대학원 지구해양학과 박사과정 재학



▲나 정 열(Jungyul Na)

현재 : 한양대학교 지구해양학과 교수
(한국음향학회지 8권 6호 참조)