

해양음향 토모그래피를 위한 개선된 빔형성 역산 기법

Revised Beamforming Inversion Method for Ocean Acoustic Tomography

오택환*, 오선택*, 나정열*, 유승기*, 김영신*
(Taekhwan Oh*, Suntaek Oh*, Jungyul Na*, Seungki Yoo*, Youngshin Kim*)

*한양대학교 지구해양학과

(접수일자: 2001년 12월 20일; 수정일자: 2002년 3월 22일; 채택일자: 2002년 5월 2일)

본 논문에서는 해양음향 토모그래피를 위한 개선된 빔형성 역산 기법을 제안한다. 제안된 역산 기법은 음속 구조 역산을 위해 음파도파관의 특성을 나타내는 군 속도와 위상 속도의 상관성을 이용한다. 군 속도와 위상 속도는 수신 신호의 도달시간 및 도달각에 의해 계산 가능하며, 이를 위해 빔형성 신호처리를 사용하여 수신 신호의 도달시간 및 도달각 분석을 수행한다. 본 논문에서는 제안된 알고리즘을 사용한 동해 음속 구조 역산 모의 결과를 서술하였으며, 연구 결과 제안된 빔형성 해양음향 토모그래피 역산 방법을 사용해 동해의 음속 구조 역산이 가능함을 확인할 수 있다.

핵심용어: 해양음향 토모그래피, 빔형성 신호처리, 역산기법, 유전 알고리즘

투고분야: 수중음향 분야 (5.4)

This paper presents a revised beamforming inversion method for ocean acoustic tomography. In the proposed inversion method, the relation between group velocity and phase velocity that are the characteristics of the waveguide is used for the inversion of perturbed sound speed profile. The group velocity and phase velocity can be expressed as a function of the travel time and arrival angle of the received signals that are analyzed by the beamforming signal processing. This paper illustrates the simulated results of inversion for the fluctuated sound speed profile of the East Korea Sea and we found the applicability of revised beamforming inversion method to range independent ocean.

Keywords: Ocean acoustic tomography, Beamforming, Inversion, Genetic algorithm

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.4)

1. 서론

해양의 물리적 특성 연구를 위해 광범위한 해역의 지속적인 수온 변화 관측이 요구되며 이를 관측 방법이 개발되고 있다. 일반적인 시험선과 기타 해양 관측 장비를 이용한 해양 관측 방법은 관측 자료의 정확도는 높으나 광범위한 해역에 대한 동시간적 정보를 제공해 주지는 못한다. 또한 인공 위성을 이용한 원격 해양 탐사 방법은 광범위한 해역의 동시간적 정보는 제공하나 그 정보가 표층에 제한되는 단점이 있다.

해양음향 토모그래피 (Ocean Acoustic Tomography, OAT)의 목적은 수중음향을 이용하여 광범위한 해역의 음속 구조 변화를 시공간적으로 관측하는 것이다. 최근

에는 진보된 통신 기술과 신호처리 기술을 이용한 실시간 해양음향 토모그래피에 관한 연구가 진행되고 있다[1].

실시간 해양음향 토모그래피 체계의 구축을 위해 수신 신호의 특성을 분석하여 해양 매질의 변화를 역산할 수 있는 신속한 해양음향 토모그래피 역산 방법이 요구된다. 음속 구조 역산을 위한 해양음향 토모그래피 역산 방법에는 수신 신호의 도달시간을 이용한 역산 방법 (travel time inversion method)과 수신 신호의 파형 (waveform)을 이용한 파형 역산 방법 (waveform inversion method) 등이 사용되고 있으며, 최근 수신 신호의 도달시간 및 수신 각을 사용한 빔형성 해양음향 토모그래피 역산 방법 (beamforming inversion method)이 제안되었다. 빔형성 해양음향 토모그래피 역산 방법은 기존의 도달시간만을 사용한 역산 방법에 비해 역산 속도가 빠르며 정확도가 향상된 것으로 알려져 있다[2].

빔형성 해양음향 토모그래피 역산 방법은 도달시간 분

책임저자: 오택환 (booster@ihanyang.ac.kr)
426-791 경기도 안산시 상록구 사1동 1271번지
한양대학교 지구해양학과 해양음향연구실
(전화: 031-400-4154; 팩스: 031-406-6458)

해능 (resolution) 향상을 위해 M-계열 송신 신호 (M-sequence signal)를 사용하며, 또한 수신신호의 도달시간 및 수신각 분석을 위해 빔형성 신호처리 기법을 사용한다. 음속 구조 역산은 수신신호의 수신 각 및 도달시간과 음속 구조의 고유 특성을 나타내는 군 속도 (group velocity) 및 위상 속도 (phase velocity)의 상관성을 이용함으로써 가능하다. 음속 구조 역산시 음속 구조가 수심에 대한 함수식으로 표현이 가능한 경우 각 수심에 대한 음속을 직접적으로 역산하며, 음속 구조가 수심에 대한 함수식으로 표현이 불가능할 경우 경험적 직교 함수 (Empirical Orthogonal function, EOF)의 계수를 추정하여 음속 구조를 역산한다[3,4].

기존에 제안된 빔형성 해양음향 토모그래피 역산 방법은 수신기 주변의 음속과 군 속도 및 위상 속도에 의해 계산된 최소 음속만을 이용해 수심에 따른 음속을 역산하므로 대상 해역의 시공간적 음속 변화가 심한 경우 역산 성능이 저하되며, 거리 독립 해양 환경을 대상으로 연구되었다.

본 논문에서는 거리 종속 해양 환경에서 음속 구조 역산을 위한 개선된 빔형성 해양음향 토모그래피 역산 방법을 제안하며, 제안된 역산 방법을 사용한 동해 거리 종속 환경에 대한 음속 구조 역산 모의 실험 결과를 서술한다.

본 논문의 제 2장에서는 빔형성 신호처리를 이용한 군 속도 및 위상 속도 계산 방법에 대해 설명하고, 제 3장에서는 개선된 해양음향 토모그래피 역산 방법에 대해 서술한다. 그리고 제 4장에서는 동해 음속 구조 역산 모의 실험 및 결과에 대해 설명하고, 마지막 제 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 군 속도 및 위상 속도

음파도파관 (waveguide)에서 음압의 전파는 음의 분산 현상을 나타내며, 음파도파관에서의 음의 분산 현상은 음파도파관의 기하학적 특성과 물리적 특성 변화에 의해 발생한다. 따라서 음파도파관에서의 음의 분산 현상을 기하 분산 (geometric dispersion)이라 하며 군 속도 및 위상 속도는 기하분산의 특징을 나타낸다[5].

음파도파관에서의 에너지 교환 속도를 나타내는 군 속도는 파열 (wavetrain)의 이동 속도와 일치하며 수평 군 속도 (horizontal group velocity, $v_{gr,m}^h$)와 수직 군 속도 (vertical group velocity, $v_{gr,m}^v$)로 구분된다. 위상 속도

$v_{\theta,m}$ 는 파가 진행하는 방향에 대해 같은 위상을 갖는 파면의 속도를 의미하며, 음파도파관에서의 위상 속도는 수평 파수 (horizontal wave number)를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$v_{gr,m}^h = \frac{\partial \omega}{\partial k_{r,m}} \tag{1}$$

$$v_{gr,m}^v = \pm \frac{\partial \omega}{\partial k_{z,m}} \tag{2}$$

$$v_{\theta,m} = \frac{\omega}{k_{r,m}} \tag{3}$$

여기서 ω 는 각주파수, $k_{r,m}$ 은 수평파수, $k_{z,m}$ 은 수직파수이며 아래 첨자 m 은 정상 모드의 m 번째 모드를 나타낸다.

음원의 송신 신호를 광대역 신호 (wideband signal)라 가정하면 거리 r 및 수심 z 에서의 모드 압력 (modal pressure)은 수신 신호에서 근접한 4개 모드 평면파로써 나타낼 수 있으며, 음압 $p_m(r,z)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$p_m(r,z) = A_m \sum_{\epsilon_1, \epsilon_2} \epsilon_1 \epsilon_2 e^{i\phi_m(\epsilon_1, \epsilon_2, r, z)} \tag{4}$$

A_m 는 각 모드 진폭 (modal amplitude)를 나타내며, $k_{r,m}$, $k_{z,m}$ 은 모드 이론에 의해 발사각 (launch angle) θ_m 에 따라 결정된다[6]. $\epsilon_1 = \pm 1$, $\epsilon_2 = \pm 1$ 은 상수이다.

$$k_{r,m} = k_0 \cos \theta_m \tag{5}$$

$$k_{z,m} = k_0 \sin \theta_m$$

또한 위상은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_m(\epsilon_1, \epsilon_2, r, z) = k_{r,m} r + \epsilon_1 \int_{z_m}^r k_{z,m}(z) dz + \epsilon_2 \int_{z_m}^z k_{z,m}(z) dz \tag{6}$$

여기서 z_m^+ 는 모드 상위 전향점 (modal upper turning point)을 나타내며, $\epsilon_1 = \pm 1$, $\epsilon_2 = \pm 1$ 은 상수이다.

해양 매질에서 음 전파 시간은 수평 군 속도와 수직 군속도의 선형 식으로 나타낼 수 있다.

$$t_m(\epsilon_1, \epsilon_2, r, z) = \frac{r}{v_{gr,m}^h} + \epsilon_1 \int_{z_m}^r \frac{dz}{v_{gr,m}^v(z)} + \epsilon_2 \int_{z_m}^z \frac{dz}{v_{gr,m}^v(z)} \tag{7}$$

또한 전향점 수심 z_m 의 음속 $c(z_m)$ 은 음원 수심에서의 음속 c_s 과 음원에서 θ_m^s 의 모드 발사각을 사용하여 계산할 수 있다.

$$c(z_m) = \frac{c_s}{\cos \theta_m^s} \quad (8)$$

식 (3), (5) 및 (8)을 이용하여 위상 속도를 음원 중심의 음속과 발사각으로 나타낼 수 있으며, 결과적으로 위상 속도는 모드 전향점에서의 음속과 같음을 알 수 있다.

$$v_{\theta,m} = \frac{\omega}{k_{r,m}} = \frac{c_s}{\cos \theta_m^s} = c(z_m) \quad (9)$$

임의의 해역을 거리 독립 해양 환경이라 가정한 경우, 동일한 전향점에 대해 같은 수심을 갖는 음원의 발사각과 수신기의 신호 수신각은 동일하다. 따라서 거리 독립 음파 전달 환경에서 수신 신호의 위상 속도는 모드 수신각 θ_m^R 과 수신기 수심 음속 c_R 을 사용하여 나타낼 수 있다.

$$v_{\theta,m} = \frac{c_s}{\cos \theta_m^s} = \frac{c_R}{\cos \theta_m^R} = c(z_m) \quad (10)$$

근접한 4개의 모드 평면과 평균 M_p 을 이용하여 수신 신호의 도달시간 및 수신각을 근사식으로 표현할 경우 수직 군 속도의 영향이 작아져 음의 전파 시간은 수평 군 속도만의 함수 식으로서 표현된다[7].

$$\cos \theta_{M_p}(z) = \frac{c(z)}{v_{\theta,M_p}} \quad (11)$$

$$t_{M_p} = \frac{r}{v_{gr,M_p}^h}$$

일반적으로 수신 신호의 도달시간 및 수신각 분석은 선배열 수신기를 이용한 빔형성 신호처리 기법을 사용한다. 빔형성 신호 처리에 의한 군 속도는 최대 에너지의 도달시간 t_n 및 음원과 수신기 사이의 거리 r 을 사용하여 계산하며, 위상 속도는 수신 신호의 수신각 θ_m^R 및 수신기 수심의 음속 c_R 을 사용하여 계산할 수 있다.

$$v_{gr,n} = \frac{r}{t_n} \quad (12)$$

$$v_{\theta,n} = \frac{c_R}{\cos \theta_n^R}$$

빔형성 신호처리시 선배열 구성 수신기의 간격에 의한 오차는 빔형성 신호처리의 수신각 분석 성능을 저하시킨다[8]. 수신각의 오차는 수신 신호의 위상 속도 계산시 오류를 유발하여 음속 구조 역산 성능을 저하시키므로 빔형성 신호처리시 수신기 위치 오차를 보정해야 한다.

III. 개선 해양음향 토모그래피 역산 방법

개선된 해양음향 토모그래피 역산 방법은 선형 선배열 수신기의 음파 도달시간 및 수신각과 음속 구조의 특징을 나타내는 군 속도 및 위상 속도와 상관성을 사용하며, 신호 도달 시간의 분해능 향상 및 빔형성 신호처리의 수신각 분해능 향상을 위해 M-계열 송신 신호를 사용한다. 일반적으로 M-계열 송신 신호의 사용은 CW 신호에 비해 음파 도달 시간 분해능 및 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[9]. 음파의 수신각 및 도달시간은 빔형성 신호처리 기법을 사용하여 계산한다. 또한 역산 결과의 정확도 향상을 위해 경험적 직교함수 분석을 통한 축적된 해양 관측 자료의 통계학적 분석 자료를 이용하여, 최적 EOF 계수의 추정 오차 최소화 및 계산 시간 절약을 위해 해의 전역 탐색 및 국지적 탐색 성능이 뛰어난 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm)을 사용한다(그림 1).

수평거리에 따라 수심 및 음속 구조의 변화가 없는 거리 독립 해양의 음속 구조는 해양의 평균 음속 구조와 변동량의 합으로 나타낼 수 있으며, 그 변동량은 기존의 관측 자료를 경험적 직교함수 분석을 통해 얻은 운동 고유벡터 (eigenvector) 와 그 계수 (eigenvalue)로서 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$c(z) = c_0(z) + \alpha_1 F_1(z) + \alpha_2 F_2(z) \quad (13)$$

여기서 $c_0(z)$ 는 평균 음속 구조를 의미하며, F_1, F_2 는

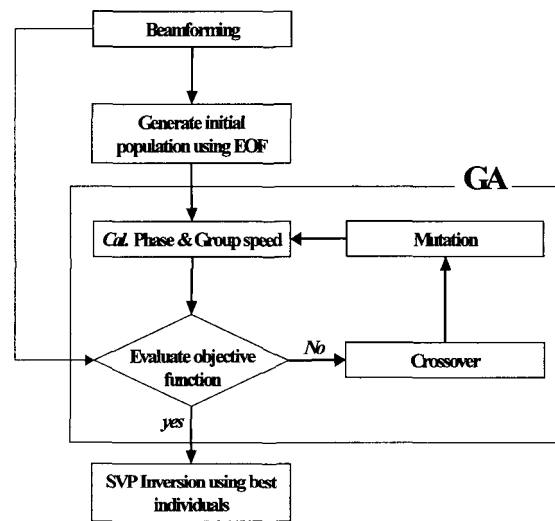


그림 1. 개선된 빔형성 역산 방법 모식도
Fig. 1. Block diagram of the revised beamforming inversion algorithm.

제 1, 2 고유벡터를 나타낸다. α_1, α_2 는 그 계수이다.

음속 구조가 수평거리에 따라 변화할 경우 음속 구조는 식 (14)와 같이 거리 r 및 수심 z 의 함수로서 나타낼 수 있으며, 여기서 평균 음속 및 고유벡터 역시 r 및 z 의 함수로서 표현된다.

$$c(r, z) = c_0(r, z) + \alpha_1 F_1(r, z) + \alpha_2 F_2(r, z) \quad (14)$$

식 (14)는 음속 구조 변화량은 그 계수의 크기에 따라 결정됨을 의미하며, 이는 수신 신호로부터 그 계수만을 추정함으로써 음속 구조 역산이 가능함을 나타낸다.

수평거리에 따라 변화하는 음속 구조 역산을 위해 해양 환경을 각 모드 (mode)의 전파가 서로 독립적인 단일 거리 종속 환경 (adiabatic range dependent environment) 이라 가정한다. 이때 각 모드 에너지의 전파 속도는 수평 거리에 따른 음속 구조의 군 속도에 의해 결정되며, 각 모드 에너지의 수신 각은 수신기 주변 음속 구조에 의해 결정된다[10].

거리 종속 환경의 음속 구조 역산을 위한 유전자 알고리즘의 목적 함수 (object function)는 수신신호의 군 속도 및 위상 속도와 모드 이론 음향 모델에 의해 계산된 모드별 군 속도 및 수신기 주변 음속 구조의 위상속도로 구성된다.

$$\text{Object function} = \frac{1}{\hat{F}^T (FF^T)^{-1} \hat{F}} \quad (15)$$

여기서 \hat{F} 는 모드 이론 모델에 의해 계산된 군 속도 및 위상 속도 행렬을 나타내며, \hat{F}^T 는 \hat{F} 의 전치 행렬을 의미한다. F 및 \hat{F} 는 수신 신호로부터 계산된 군 속도 및 위상 속도 행렬 및 그 전치 행렬을 나타낸다.

유전자 알고리즘에서 초기 집단 생성은 경험적 작교 함수 분석시 획득된 경험적 EOF 계수를 사용한 발견적 방법을 사용하여 생성하며, 다수 해 동시 탐색 방법을 이용하여 다수의 계수를 동시에 탐색 가능하도록 설계한다. 음속 구조 역산을 위해 발견적 방법을 사용할 경우 해 탐색 시간의 절약은 가능하나 해양의 시간적 변화가 심한 경우 해 탐색 성능이 저하된다. 따라서 역산 성능 향상을 위해 유전자 알고리즘에서는 해양의 시간적 불확실성 (temporal uncertainty)에 의한 영향을 고려해 교배 집단 (crossover population) 및 돌연변이 집단 (mutation population) 생성 등 탐색 전략을 최적 설계해야만 한다.

IV. 모의실험 및 결과

4.1. 모의 실험

제안된 알고리즘을 사용하여 동해 음속 구조 역산 모의 실험을 실시하였다. 모의 실험을 위한 환경자료는 국립수산진흥원 해양자료센터의 동해 105 정선의 21년 (1980~2000)간 자료를 내삽법에 의해 20 정점으로 재구성하여 사용하였고, 수평거리는 약 70 km이다. 관측 자료의 상부 음속 구조 분석 결과 수심 약 300 ~ 500 m 부근을 중심으로 최소 음속 층이 형성되며, 최소 음속은 약 1457 m/s 임을 알 수 있다 (그림 2).

EOF분석결과 표층 수온 변화를 의미하는 제 1 모드의 기여도는 약 39%이며, 수온약층의 변화를 의미하는 제 2 모드의 기여도는 약 20%로 분석되었다. 또한 제 5모드까지의 기여도가 전체 변화량의 약 80%를 나타냈다. 즉 80%음속 구조 변화량의 역산을 위해 제 1~5 모드 계수를 추정해야 함을 알 수 있다 (그림 3).

음원은 무지향성 단일 음원이며, 수신기는 34개의 무

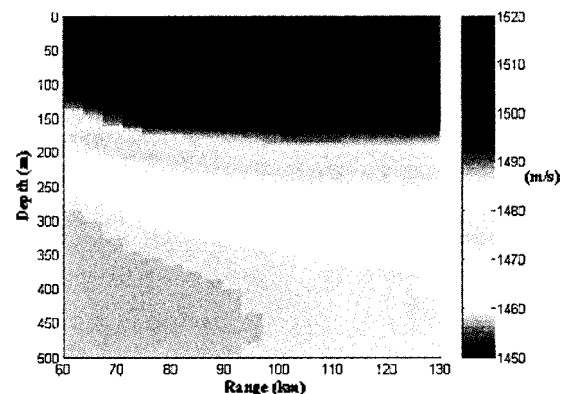


그림 2. 음속 구조 변화
Fig. 2. Spatial variations of the sound speed.

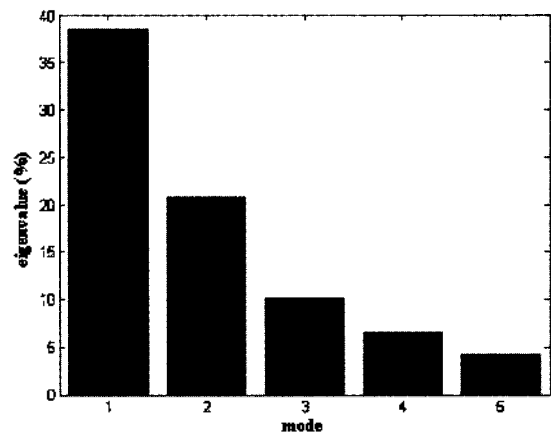


그림 3. 음속 구조의 고유치 분포
Fig. 3. Eigenvalue of the sound speed profiles.

지향성 수신기로 구성된 선형 선배열 수신기로 가정하였다. 구성 수신기 사이 간격은 3 m이며, 선배열 수신기의 총 길이는 99 m이다. 음원의 설치 수심은 450 m 이고, 선배열 수신기의 설치 수심은 550~650 m로 가정하였다. 이때 해수의 움직임에 의한 수신기 위치 오차는 무시하였다.

송신신호의 모의는 모드 이론 음향 모델인 KRAKEN 모델을 이용하여 모의하였고 (그림 4), 음파 도달 시간 분해능 및 신호 대 잡음비 향상을 위해 M-계열 신호로 가정하였다.

송신 주파수는 200 Hz, 신호대 잡음비는 약 30 dB로 가정하였다. 송신 신호의 세부 특성은 표 1에 나타내었다.

선배열 수신기에 의해 수신된 신호는 복조 상관기를 이용한 펄스 압축방법을 사용하여 음파 도달 시간 특성을 분석하였다. A/D 변환사 변환 주파수 (sampling frequency) 는 송신 주파수의 20배로 가정하였으며, 선형 선배열 수신기에 수신된 음파의 수신각 θ 는 주파수 영역에서의 빔형성 분석 기법을 사용하여 계산하였다 (그림 5).

수신 신호의 군 속도 및 위상 속도는 식 (12)를 이용하여 계산하였다 (그림 6).

그림 6의 \bullet 는 모델에 의해 계산된 군 속도와 위상 속도를 나타내며, \circ 는 모의 수신 신호로부터 계산된 군 속도와 위상 속도를 나타낸다. 점선은 군 속도와 위상 속도가 같은 경우를 나타낸다. 수신 신호로부터 계산된 군 속도와 위상 속도의 근사 곡선과 점선의 교점이 최소 음속을

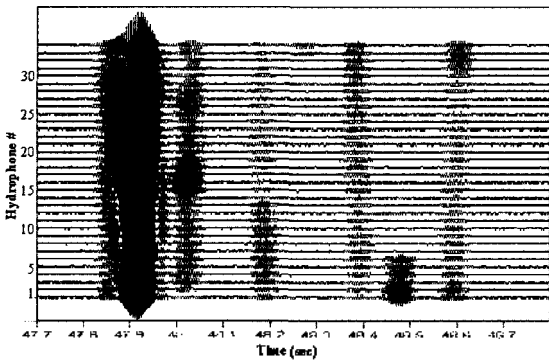


그림 4. 모의 수신 신호의 시공간적 분포 형태
Fig. 4. Spatial-temporal distribution of the simulated receiving signals.

표 1. 송신신호 특성
Table 1. Transmission descriptions.

Frequency	200 Hz
Order	3
Cycles/digit	13
Digit duration	0.015 sec

나타낸다.

음속 구조 역산을 위한 EOF 계수 추정에는 유전자 알고리즘[11]을 사용하였다. 이때 최적 해 탐색을 위한 초기 집단은 관측 자료 분석 결과로부터 얻은 경험적 계수로 구성하였고 개체 수는 20 개체로 제한하였으며, 총 자식 세대 수는 2000 세대로 제한하였다. 전역 탐색을 위한 돌연변이 개체의 생성은 각 세대간 40%로 설정하였다. 또한 유전자 알고리즘의 최적 해 선택 전략의 안정성 검토를 위해 음속 구조 역산을 100회 반복 모의하였다.

4.2. 모의 결과

동해 8월 음속 구조를 이용한 모의 실험 결과 역산 최대

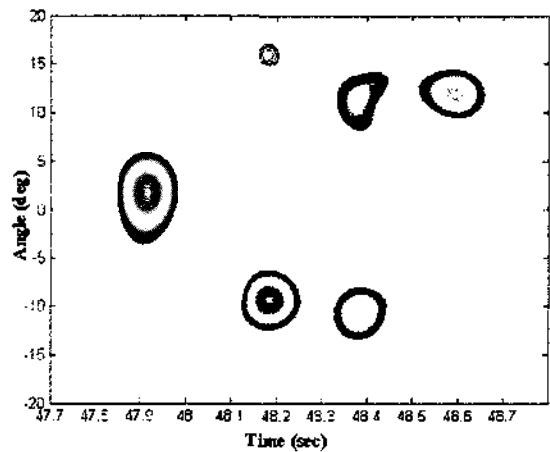


그림 5. 빔형성 신호 처리 결과
Fig. 5. Result of the beamforming analysis.

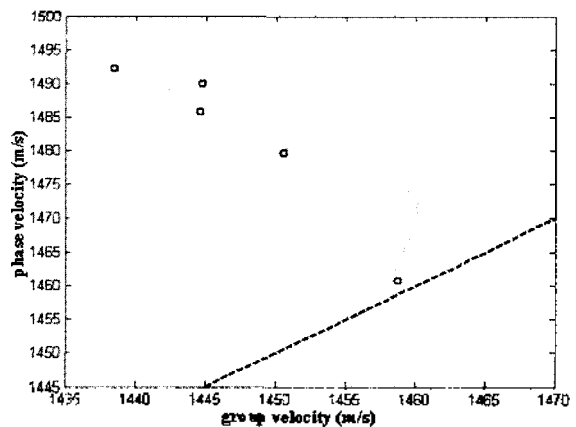


그림 6. 군 속도 및 위상 속도 추정 (\circ : 빔형성 결과로부터 추정된 군 속도 및 위상 속도, \bullet : KRAKEN 모델에 의해 계산된 군 속도 및 위상 속도, ---: 군 속도 및 위상 속도가 같은 경우)

Fig. 6. Group and phase velocities reconstruction (estimated group and phase velocities from beamforming pattern (circles), calculated group and phase velocities by KRAKEN (dots), the dashed line corresponds to the line $v_p = v_g$).

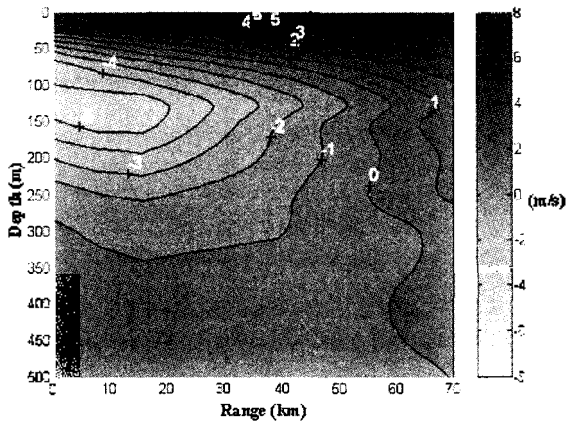


그림 7. 관측 음속 구조와 역산 음속 구조의 차
Fig. 7. Difference of the observed sound speed and reconstructed sound speed.

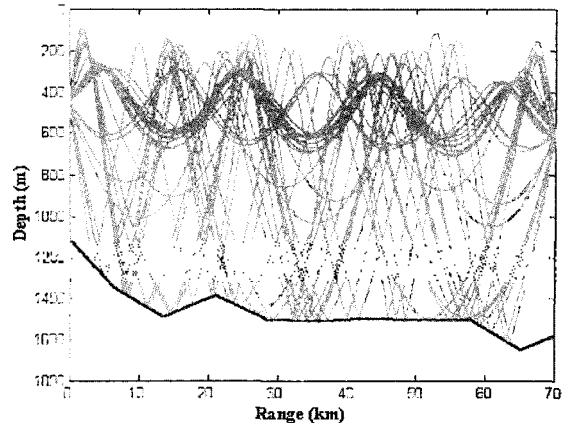


그림 8. 관측 음속에 대한 고유음선 경로
Fig. 8. Eigenrays between a source and a receiver for observed sound speed.

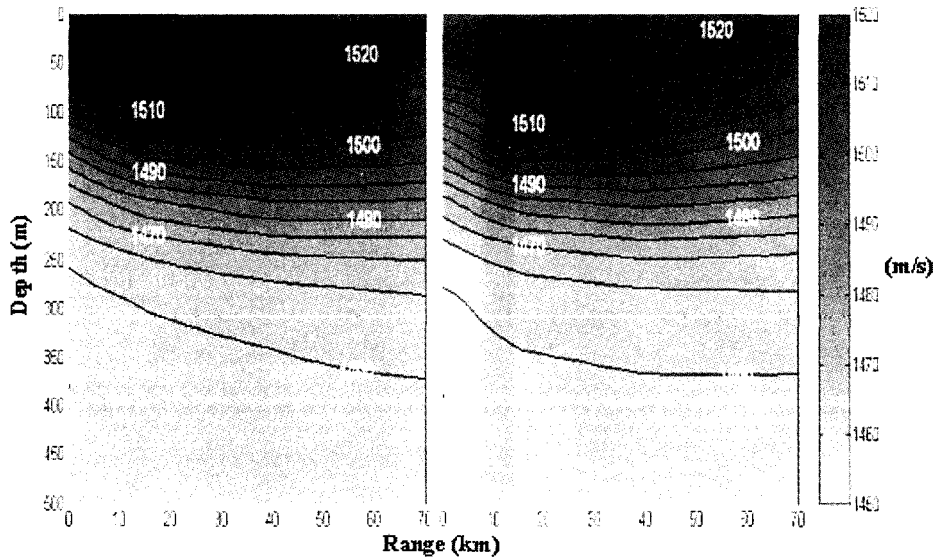


그림 9. 관측된 음속 구조 및 역산 음속 구조
Fig. 9. Observed sound speed (left) and reconstructed sound speed (right).

오차는 ± 8 m/s이다. 이는 약 2°C 수온에 해당한다. 역산 오차의 분포는 그림 7에 나타냈다.

역산 오차의 분포는 수평적으로 음원 주변에서의 오차가 수신기 주변에서의 오차보다 크게 나타났다. 또한 수직적으로 살펴보면 표층에서 그 오차가 가장 크게 나타났으며, 수심이 증가함에 따라 그 오차가 감소함을 알 수 있다.

이와 같은 역산 오차의 발생은 동해 음속 구조의 음파 도파관이 두껍지 못하여 낮은 발사각을 갖는 음선들이 음파 도파관에 집중되어 그 도달시간의 차이가 작아 모의 수신 신호로부터 각 도달 음선들의 도달 시간 및 수신각을 정확하게 계산하지 못하였기 때문이다.

제안된 알고리즘을 통해 역산된 음속구조를 그림 9에

나타내었다. 역산 결과, 역산된 음속 구조는 모의 환경의 음속 구조를 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 거리 종속 해양의 음속 구조 파악을 위한 개선된 빔형성 해양음향 토모그래피 역산 방법을 제시하였으며, 동해 거리 종속 해양 환경을 대상으로 한 모의 실험을 통하여 그 가능성을 검증하였다.

제안된 역산 알고리즘은 빔형성 신호처리 기법을 사용하여 계산된 수신 신호의 군 속도 및 위상 속도와 모의 이론 음향 모델에 의해 계산된 군 속도 및 위상 속도와

상관성을 이용하여 EOF 계수를 추정하며, 이를 음속 구조 변화 고유 벡터와 결합하여 음속 구조를 역산한다. 이때 수신신호의 해상도 향상을 위해 M-계열 송신 신호를 사용한다.

고유음선 경로 분석 결과 동해 음속 구조는 음파도파관이 두껍지 못하여 최소 음속 층 부근에 위치한 음원에서 방사된 대부분의 음선들이 음파도파관에 집중되었다. 이와 같은 음선들의 음파도파관 집중 현상은 수신 신호로부터 계산된 신호 도달시간 및 수신각의 해상도를 낮추어 군 속도 및 위상 속도 계산시 오차 발생 및 그 정보 손실의 원인이 되었다. 이와 같은 동해 음속 구조의 특징은 도달 시간을 이용한 해양음향 토모그래피 역산 방법의 경우에도 큰 역산 오차 발생의 원인이 될 것으로 생각된다.

본 논문에서는 수신신호로부터 5개의 도달시간 및 수신각을 계산하였으며, 이를 이용해 음속 구조 역산 모의를 수행하였다. 그 결과 최대 오차 ± 8 m/s의 우수한 역산 성능을 확인할 수 있었다.

차후 음파도파관에 집중된 음선들의 군 속도 및 위상 속도 계산을 향상시키기 위한 연구가 계속적으로 진행되어야 할 것으로 생각되며, 해상 실험을 통한 알고리즘 검증 및 보완이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 수중음향 특화연구센터 (UARC)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. J. Lynch and S. Smith, *Real-Time Tomography Mooring*, WHOI Tech. Report, WHOI-92-29, 135, 1992.
2. P. Pignot, "Beamforming inversion," *Proceedings of the 8th Matched-field Processing Workshop*, San Diego, 193-203, 1996.
3. P. Pignot, B. Faure, and G. Ginolhac, "Comparison between different inversion methods for ocean acoustic tomography (Comparison on experimental data)," *Oceans '98 Conference*

- Proceedings*, 3, 1214-1218, 1998.
4. P. Pignot and B. Faure, "Two inversion methods for ocean acoustic tomography," *OCEANS '97, MTS/IEEE Conference Proceedings*, 2, 743-747, 1997.
5. H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press, San Diego, Chap. 11, 468-540, 1996.
6. G. V. Frisk, *Ocean and Seabed Acoustics; A Theory of Wave Propagation*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, Chap. 5, 110-167, 1994.
7. M. Guthrie and C. T. Tindle, "Ray effect in the normal mode approach to underwater acoustics," *J. Sound Vib.*, 47 (3), 403-413, 1976.
8. 오택환, 오선택, 박정수, 나정열, "다중경로 환경에서의 해저면 설치 수신기 3차원 위치 추정," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 20 (2s), 353-356, 2001.
9. 오선택, 나정열, 오택환, 박정수, 나영남, 김영규, "한국 동해에서 토모그래피용 신호를 이용한 음파 도달시간 시변동성," 한국음향학회지, 20 (5), 92-99, 2001.
10. W. Munk, P. Worcester and C. Wunsch, *Ocean Acoustic Tomography* Cambridge University Press, Chap. 4, 136-172, 1995.
11. 공성근, 유전자 알고리즘 입문, 진영사, Chap. 5, 232-268, 1997.

저자 약력

● 오 택 환 (Taekhwan Oh)

2000년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학사)
 2000년 3월 ~ 2002년 2월: 한양대학교 지구해양학과 대학원 (이학석사)
 2002년 3월 ~ 현재: 한양대학교 지구해양학과 대학원 박사과정
 ※ 주관심분야: 해양음향 토모그래피, 수중소음, 정합장 신호 처리

● 오 선 택 (Suntaek Oh)

1992년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학사)
 1995년 2월: 한양대학교 지구해양학과 대학원 (이학석사)
 1999년 3월 ~ 2003년 8월: 한양대학교 지구해양학과 대학원 (이학박사)
 ※ 주관심분야: 해양음향 토모그래피, 수중음향 신호처리, 수중음향 모델링

● 나 정 열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조

● 유 승 기 (Seungki Yoo)

2002년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학사)
 2002년 3월 ~ 현재: 한양대학교 지구해양학과 대학원 석사과정
 ※ 주관심분야: 수중음향 신호처리, 해양음향 토모그래피

● 김 영 신 (Youngshin Kim)

1997년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학사)
 2002년 8월 ~ 현재: 한양대학교 지구해양학과 대학원 석사과정
 ※ 주관심분야: 수중음향 신호처리, 정합장 신호 처리