

심해역 광대역 신호 모델링 기반 수중 음원의 심도 추정 및 특성 분석 연구

김선호¹⁾ · 김한수¹⁾ · 강돈혁¹⁾ · 조성호^{*,1)}

¹⁾ 한국해양과학기술원 해양영토·방위연구부

Study on Depth Estimation and Characteristic Analysis of Underwater Source Based on Deep-Sea Broadband Signal Modeling

Sunhyo Kim¹⁾ · Hansoo Kim¹⁾ · Donhyug Kang¹⁾ · Sungho Cho^{*,1)}

¹⁾ Marine Domain & Security Research Department, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Korea

(Received 22 May 2024 / Revised 24 July 2024 / Accepted 24 July 2024)

Abstract

Studies on estimating the underwater sound source localization using acoustic signal characteristics have mainly been conducted in shallow waters. Recently, technologies for stably and efficiently estimating the underwater sound sources localization using the underwater sound propagation characteristics of the Reliable Acoustic Path(RAP) in deep water areas are being studied. Underwater surveillance technology in deep sea areas is known to have the advantage of having low detection performance variability due to time-varying underwater environments and having a small shadow zone, making it easy to stably detect underwater sound sources and estimate location even from relatively long distance. In this study, we analyzed the sound propagation characteristics based on the actual marine environment in the deep sea of the Korean Peninsula and conducted a study to analyze the estimation performance of sound source depth using the broadband interference pattern of direct wave and sea surface reflected waves radiating from underwater sound sources.

Key Words : Broadband Signal(광대역 신호), Broadband Interference Pattern(광대역 간섭 패턴), Deep Water Acoustic Propagation(심해 음파전달), Underwater Surveillance Technology(수중 감시 기술)

1. 서론

수동소나 시스템에서 음파전달 특성을 이용한 수중

음원의 수심을 추정하는 연구는 수십 년 동안 수행됐고, 현재에도 많은 기법들이 논문으로 발표되고 있다. 이러한 대부분의 과거 연구는 주로 천해(수심 200 m 이내) 환경에서 선배열 수신기를 이용한 정합장 처리 기법, 배열 불변성, 빔형성 기법, 인공지능 등을 결합하여 음원 심도를 추정하기 위한 연구들이 발표되었다¹⁻⁴⁾.

* Corresponding author, E-mail: shcho@kiost.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

최근 들어 수중음향 장비의 발전과 광해역 수중 감시 시스템의 필요성이 대두됨에 따라 선진국에서는 대수심 해역에서 신뢰 음향 경로(Reliable Acoustic Path, RAP)의 수중 음파전달 특성에 관심을 가지고 있다. 심해역에서 해저면에 음향 수신기가 위치하는 경우 시변 수중 환경(수중 음속 구조)에 따른 탐지성능 변동성이 낮고, 음영구역이 적어 원거리에서도 안정적인 수중 음원 탐지 및 위치 추정이 가능하다고 알려져 있다. 따라서, 심해역에서 효율적인 수중 음원의 위치를 추정하는 수중 감시 기법들이 연구되고 있다⁵⁻⁹.

국내의 경우, 동해와 같이 수심이 깊은 대수심 환경에서 수행한 연구들은 주로 난수성 소용돌이 환경이 원거리 음파전달에 미치는 영향성 분석 연구¹⁰, 동해 원거리 수중 통신 성능 분석 연구¹¹, 동해 와동류 수온 구조에서의 선저부착형 소나 운용에 있어서 음영구역을 최소화하는 운용 기법 연구¹² 등이 있는 반면에 음향 수신기가 대수심 해역 해저에 있는 경우 음파전달, 수중소음 특성 및 원거리 수중 음원의 수심을 안정적으로 추정하는 연구는 부족한 실정이다.

Fig. 1은 천해 해양환경[수심 200 m, 음원 수심 100 m, 해저 저질 6 Φ(Medium silt)]에서 계절별(봄, 여름, 가을, 겨울) 수중 음속 구조를 고려한 음파전달 특성을 나타낸다. 천해에서의 음파전달은 계절에 따른 음속 구조의 변동성과 경계면(해수면, 해저면)의 다중경로로 인하여 전달 거리에 따라 높은 음영구역 변동성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히, 해저면에 상부에 놓인 수신기와 송신기 간 거리에 따라 음영구역 변동성이 우세하게 나타난다.

반면에 Fig. 2는 심해역 해양환경(수심 2000 m, 음원 수심 100 m, 해저 저질 6 Φ(Medium silt), 계절별 수중 음속 구조)에서 음파전달 특성을 나타낸다. 수중 음원에서 송출 및 방사된 음파는 직접파와 해수면 반사 경로가 우세하게 나타나며, 해저면 상부에 위치한 수신기와 송신기 간 거리에 따라 안정적으로 전파되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 심해의 경우 계절별 수중 음속 구조에 따른 음파전달 변동성이 상대적으로 근거리에서 천해역에 비하여 작게 나타나지만, 원거리에서는 음영구역이 명확하게 존재하는 것을 확인할 수 있다.

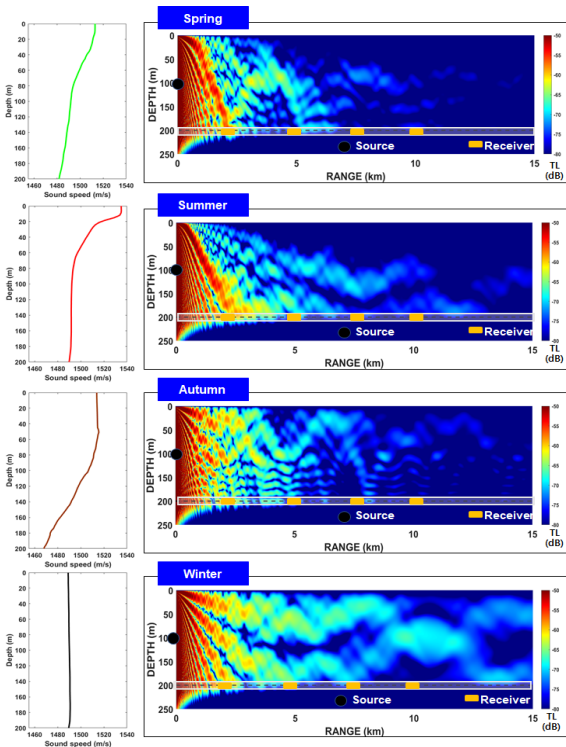


Fig. 1. Seasonal acoustic propagation characteristics in shallow water

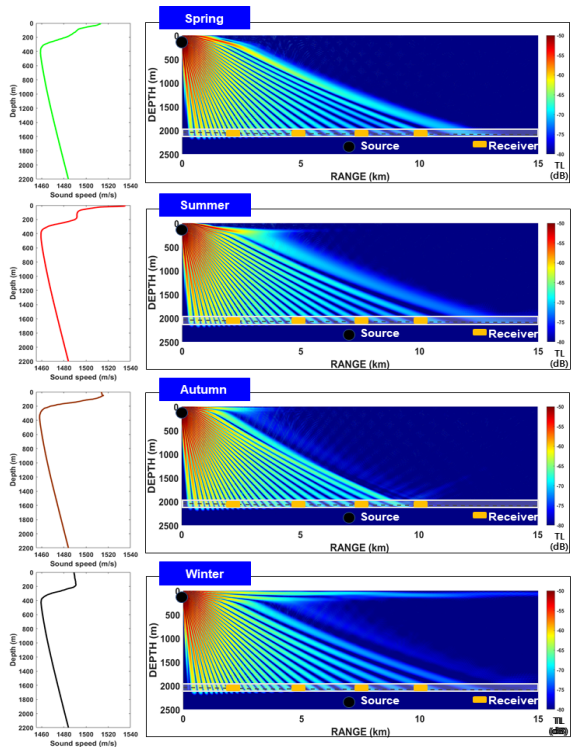


Fig. 2. Seasonal acoustic propagation characteristics in deep water

본 연구에서는 울릉도 북쪽 수심 약 2000 m 이상 대수심 해역에서 CTD(Conductivity Temperature Depth) 장비로 실 관측한 계절별(봄, 여름, 가을, 겨울) 수중 음속 구조, MBES(Multibeam Echosounder)장비로 관측한 해저 지형 및 SGS(Sediment Grab Sampler)으로 관측 및 분석한 해저면 저질 성분(지음향 인자) 자료를 기반으로 저주파 음파전달 모델링을 수행하여 심해역 음파전달 특성을 분석 및 해석하였다. 또한, 수중 음원에서 방사되고 백터센서 수신기에 수신되는 직접파와 해수면 반사파의 광대역 간섭 패턴 신호를 모의하여 수중 음원의 심도를 추정하는 M&S(Modeling and Simulation) 기법 적용을 통해 한반도 대수심 환경에서 수중 감시 시스템의 효율성을 분석하는 연구를 수행하였다.

2. 심해역 수중 음원 심도 추정 기법

2.1 광대역 간섭 패턴 기반 수중 음원 심도 추정

심해역 해저에 수신기가 위치하는 경우 직접파 및 해수면 반사파의 음향 경로가 해저면 반사 경로에 비하여 음파 전달손실이 낮기 때문에 로이드 미러(Lloyd-mirror) 음향장이 지배적이고, 음원 주파수에 따라 Fig. 3과 같이 간섭 패턴이 주기적으로 변조되는 특성을 가진다.

이미지 소스 이론에 따라 수신기에 들어오는 직접파와 해수면 반사파의 수신 음압은 다음 식 (1)과 같이 표현된다^[13,14].

$$P(r, z, w) = P_1(r, z, w) + P_2(r, z, w) \quad (1)$$

$$= S(w) \left[\frac{e^{ikR^-}}{R^-} - \gamma \frac{e^{ikR^+}}{R^+} \right]$$

여기서 $P(r, z, w)$ 는 수신 전체 음압, $P_1(r, z, w)$ 은 직접파의 음압, $P_2(r, z, w)$ 는 해수면 반사파의 음압, $S(w)$ 는 복소 음압, γ 는 해수면 반사 계수(≈ -1)이다. 음원의 심도 보다 수신기의 심도가 깊다고 가정하면($z_r \gg z_s$) 직접파와 해수면 반사파의 위상차($\sin(kz_s \sin \theta_s)$)를 포함하는 식 (2)로 유도되고, 수신기에서의 신호 강도로 나타내면 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$P(r, z, w) \approx -2iS(w) \frac{e^{ikR}}{R} \sin(kz_s \sin \theta_s) \quad (2)$$

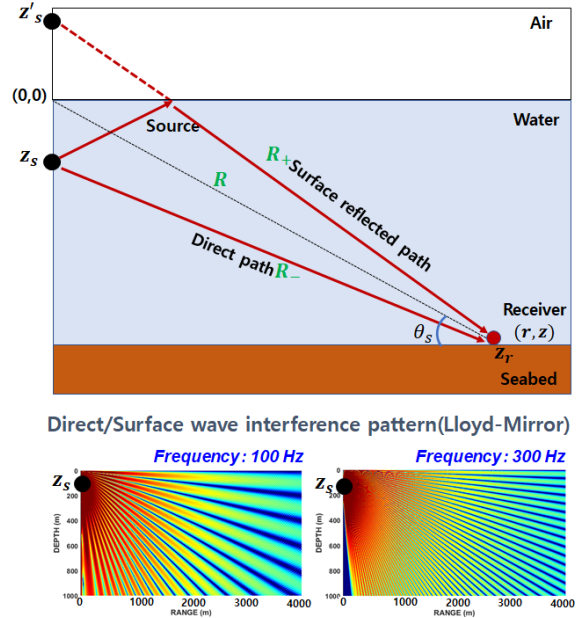


Fig. 3. An illustration of direct/surface reflected wave interference pattern(Lloyd-Mirror)

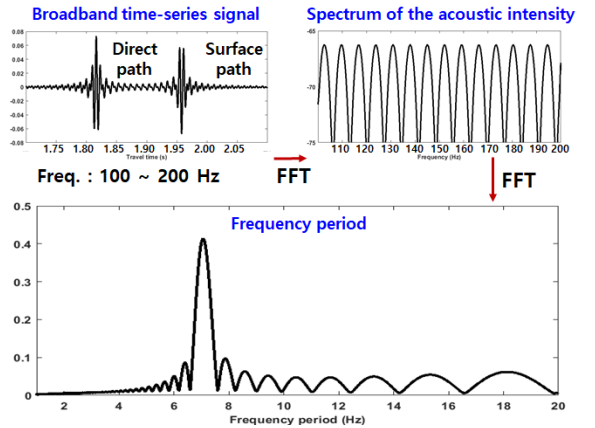


Fig. 4. The process of deriving frequency period from broadband time-series signal

$$I \approx 2 \frac{|S(w)|^2}{\rho c R^2} [1 + \cos(\pi + 2kz_s \sin \theta_s)] \quad (3)$$

위 식에서 $\cos(\pi + 2kz_s \sin \theta_s)$ 는 z_s 음원 심도, k 파수, θ_s 수신기 도달각(Received angle)에 따라 주기 변조 특성을 나타내며,^[9] 주파수에 따른 주기 변조 식으

로 나타내면, 식 (4)와 같이 음원 심도(z_s)에 대한 함수로 도출될 수 있다.

$$z_s = \frac{c}{2f_{period} \sin \theta_s} \quad (4)$$

식 (4)로부터 광대역 수신 신호의 간섭 주파수 주기 (Frequency period) f_{period} 와 수신기 도달각을 도출하면, 음원의 심도 추정이 가능하다.

2.2 광대역 신호 모델링

주파수 영역에서 광대역 표적 신호 모델링은 수중 채널 및 경계면에서 대한 음파전달 특성을 포함하기 위해 포물선 방정식 기반 RAM(Range dependent Acoustic Model) 모델을 이용하였다^[15]. 광대역 신호 모델링 방법은 RAM을 이용하여 주파수별 공간전달 함수(Spatial transfer function)를 100 Hz에서 300 Hz까지 0.5 Hz 간격으로 도출한 다음 표적 음원에 대한 스펙트럼(Source spectrum)을 곱해주고 역푸리에 변환(Inverse fourier transform)을 수행하여 식 (5)와 같이 광대역 음원 특성이 반영된 신호를 모델링하였다. 음원 신호의 스펙트럼[$S(\omega)$]은 중심주파수 200 Hz를 기준으로 3 dB 밴드폭(100 Hz)인 Hanning window를 적용하였다.

$$p(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_{min}}^{\omega_{max}} S(\omega) P(r, z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (5)$$

Fig. 5는 RAM 모델을 이용하여 직접파 및 해수면 반사 경로에 대하여 도출한 주파수별 공간전달 함수와 표적 음원에 대한 스펙트럼을 반영한 광대역 신호 모델링 결과이다.

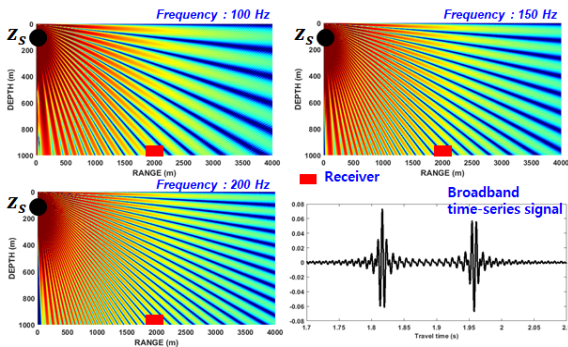


Fig. 5. The process of deriving broadband time-series signal

2.3 수신기 도달각(θ_s) 추정 기법

국내외적으로 음향 벡터 센서를 통해 측정되는 음향 입자 속도, 가속도, 변위 등 음향 벡터량을 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 선배열 수신기를 이용하여 수중의 수직 방향을 추정하기 위해서는 수신기의 개수 및 배열 사이의 간격이 증가되어 공간 효율성이 낮아지고, 해류 방향 및 유속에 따른 자세각 변동이 발생한다는 단점이 있다. 반면에 벡터센서의 벡터량은 크기뿐만 아니라 방향성을 가지고 있으므로 선배열 수중청음기에 비해 상대적인 크기가 작고 좌우 방향 모호성을 극복하면서 수중 음원의 방위각과 고도각 추정이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 벡터 센서는 수중 음원 추적, 수중 소음 감소, 수중 통신 등 다양한 분야에서 적용되고 있다^[16-19]. 음향 입자 속도(Acoustic particle velocity, $v(t)$)는 시간에 대한 오일러 방정식(Euler's equation)으로 계산할 수 있는데, 두 개의 음압 수신기가 근접하여 위치하는 경우 두 센서의 음압 기울기(Pressure gradient)는 식 (6)과 같이 유한 차분 근사(Finite difference approximation)로 도출된다.

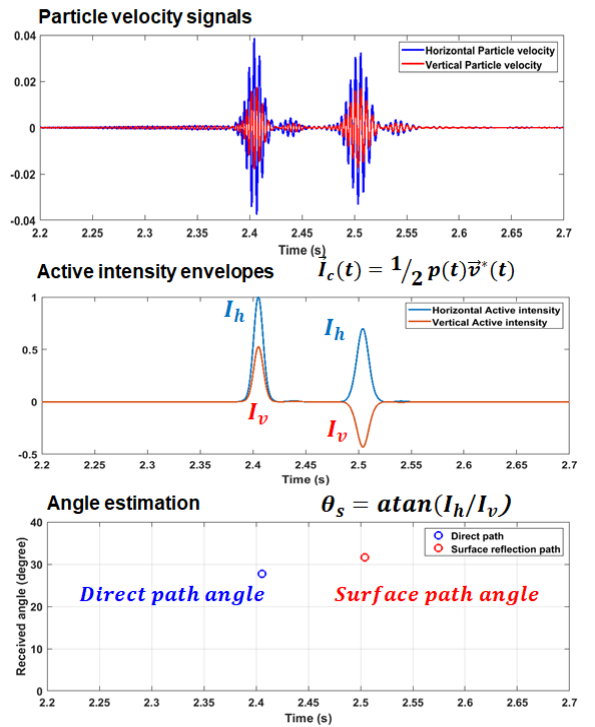


Fig. 6. The process of deriving the receiver angle of arrival from the acoustic vector sensor

$$v(t) = \frac{1}{\rho_0} \int_0^t \frac{p_{m2}(\tau) - p_{m1}(\tau)}{d} d\tau \quad (6)$$

여기서 p_{m1} 과 p_{m2} 는 인접한 두 센서에서의 음압이고, d 는 두 센서 간의 간격, τ 는 시간 변수, 그리고 ρ_0 는 해수 밀도이다. 복소 음의 강도(Complex sound intensity, $I_c(t)$)는 순간적인 전파와 비전파 에너지 플럭스를 나타내며, 식 (7)을 통해 도출된다.

$$I_c(t) = \frac{p(t)v^*(t)}{2}, \quad * \text{ complex conjugate} \quad (7)$$

I_h 와 I_v 는 수평과 수직 성분의 음파 강도이고, 각 다중 경로의 도달각도는 $\theta_i = \tan^{-1}(I_{h,i}/I_{v,i})$ 통해 도출된다^[18,19].

3. 심해역 수중 음원 심도 추정 시뮬레이션

3.1 심해역 수중 환경 및 음파전달 모델링

심해역에서 수중 음원의 심도 추정 모델링을 수행하기 위해서는 시.공간적인 환경 자료(수직 음속구조, 해저 수심 자료, 해저면 저질 성분 자료)가 필요하다.

본 연구에서 수중 음속 자료는 봄(4월), 여름(8월), 가을(10월), 겨울(1월)의 심해역 실관측 자료를 적용하였고, 해저지형은 멀티빔(Multibeam echo sounder) 실관측 자료, 그리고 천부 표층 저질 성분은 그랩(Grab)과 피스톤 코어(Piston corer, 6 m)을 이용하여 샘플을 수행하고 실험실에서 분석한 지음향 자료를 활용하였다.

수중소음은 봄, 여름, 가을, 겨울 수심 약 1850 m에서 측정/분석한 결과의 평균값을 적용하였다. 심해역 벡터센서 위치는 울릉도 북쪽(수심 2037 m) 비교적 평탄한 해저에 위치(2036 m)하고, 수중 음원은 100, 150, 200 m 심도에 존재하고 음원과 해저 바닥에 있는 수신기간 수평거리는 0~10 km를 가정하였다. Fig. 7은 모델링 해역의 입력 변수 및 해양환경 자료(수직 음속구조, 해저 수심 자료, 해저면 저질 성분 자료)를 나타낸다.

Fig. 8은 모델링 환경 자료 기반 중심 주파수 200 Hz인 경우 봄, 여름, 가을, 겨울 수직 음속 구조에서의 음파전달 손실 결과이다. Fig. 8은 음원에서 수신

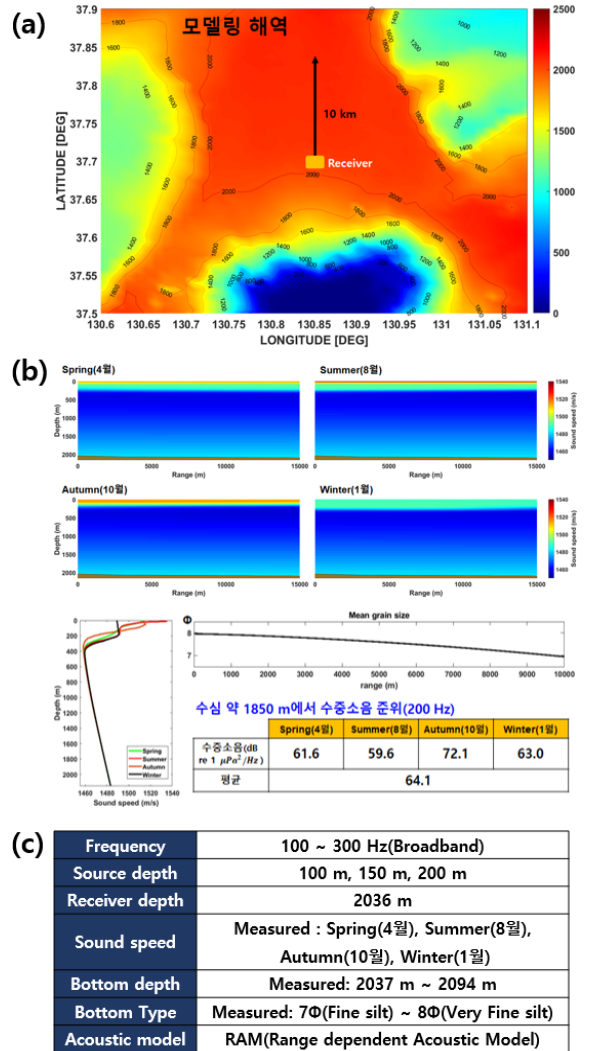


Fig. 7. Modeling environment. (a) target area, (b) environment data(sound speed, surficial sediment, ambient noise), (c) modeling input parameter

기로의 음파전달 경로 및 손실 결과와 수신기에서 음원으로의 음파전달 경로 및 손실 결과는 동일하다는 음파전달의 가역성의 원리를 기반으로 모델링이 수행되었다. 따라서 음원이 0~300 m 심도와 0~10 km 거리에 분포되어 있을 때 계절에 따라 수신기에 전파되는 특성을 쉽게 해석할 수 있다. 계절에 따른 음파전달 변동성은 표층 심도 약 300 m 이내에서 우세하며, 깊은 심도에서의 음파전달 특성 차이는 크지 않았다.

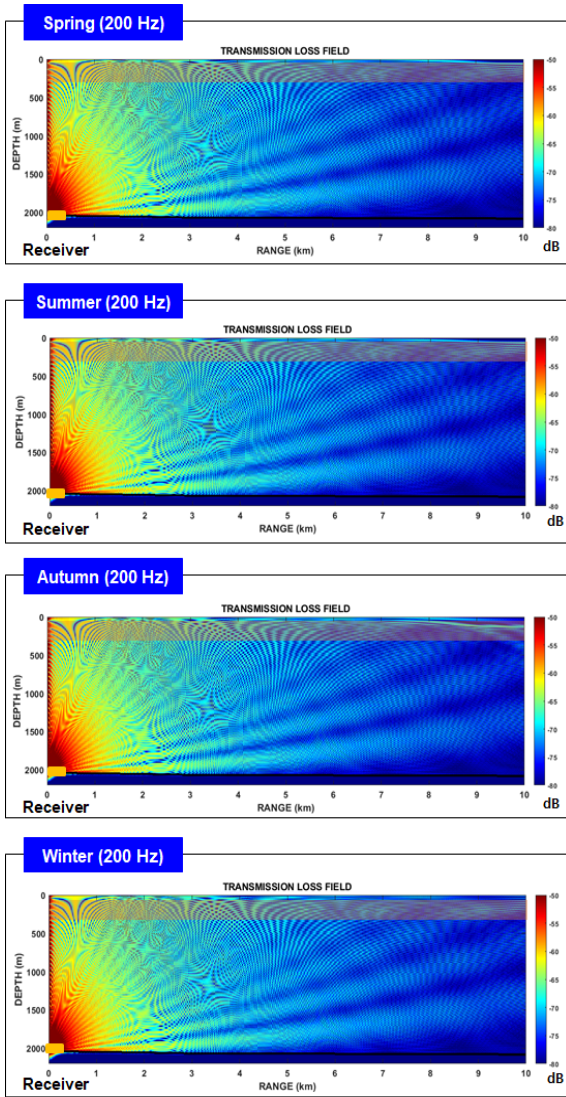


Fig. 8. A seasonal sound propagation characteristics in a modeling environment

음파전달 특성 결과를 토대로 광대역 간섭 패턴 기반 수중 음원의 심도 추정 기법의 성능은 표층 심도에서의 음파 굴절 여부에 따라 성능이 변동할 수 있다. 따라서 계절별 음속구조에 따른 수중 음원의 심도 추정 성능을 도출하는 모델링을 수행하였다.

3.2 심해역 수중 음원 심도 추정 모델링

심해역에서 계절별 수중 음원의 심도 추정 성능을 확인하기 위하여 광대역 신호 모델링 기반 심도 추정

모델링을 수행하였다. 수중 음원은 100, 150, 200 m 심도에 존재한다고 가정하고 음원과 해저 바닥에 위치하는 벡터센서 수신기간 수평거리는 0~10 km를 가정하였다. 해저면에 가깝게 위치하는 벡터센서에 수신되는 광대역 모델링 신호를 이용하여 도달각을 추정하고 광대역 간섭 패턴 기반 심도 추정 기법을 적용하여 수중 음원의 심도 추정 모델링을 수행하였다.

Fig. 9는 봄(4월), 여름(8월), 가을(10월), 겨울(1월)의 음속구조에 따른 음파 전달 특성을 반영한 수중 음원의 심도 추정 결과로 검은 실선은 각 수평거리별 추정 심도를 나타낸다.

봄(4월)과 가을(10월)철은 층심도의 두께를 제외하면 유사한 음속 구조를 가지므로 수중 음원의 심도 추정 결과도 유사하게 나타나지만, 여름(8월)인 경우 표층의 높은 음속의 영향으로 음원 심도 부근에서 음파 하향 굴절의 영향이 크게 나타나며 광대역 간섭 패턴이 불규칙하게 깨지면서 음원과 수신기간 수평거리 멀어짐에 따라 높은 심도 추정 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 겨울(1월)철인 경우 상대적으로 수심 변화에 따른 낮은 음속 변동성으로 인하여 음파 하향 굴절이 상대적으로 원거리에서 발생하며 음원과 수신기간 수평거리가 원거리임에도 불구하고 수중 음원의 심도 추정 성능이 좋게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 심해역 환경과 같이 음향 수신기가 해저에 가깝게 위치하고 수중 음원이 표층에 위치하는 경우 음원에서 수신기로의 음파전달 다중경로는 주로 직접파와 해수면 반사파가 우세하게 나타난다. 또한 음원과 수신기간 수평거리가 근거리인 경우에는 계절별 음속 구조에 따른 음파 굴절 변동성이 낮게 발생하기 때문에 높은 음원 심도 추정 성능을 가지게 된다.

4. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 우리나라 동해 심해역(수심 2000 m 이상)에서 실 관측 해양환경 자료와 검증된 음파전달 모델을 활용하여 저주파 광대역 신호 모델링을 수행하였고, 벡터센서 수신기를 가정하여 수중 음원의 계절별(봄, 여름, 가을, 겨울) 심도 추정 성능을 도출 및 특성을 분석하는 연구를 수행하였다. Fig. 9의 수중 음원 심도 추정 결과에서 허용오차를 50 m라고 가정한다면, Fig. 10과 같이 심해역에서 계절별 수중 음원의 심도 추정 거리를 도출할 수 있다.

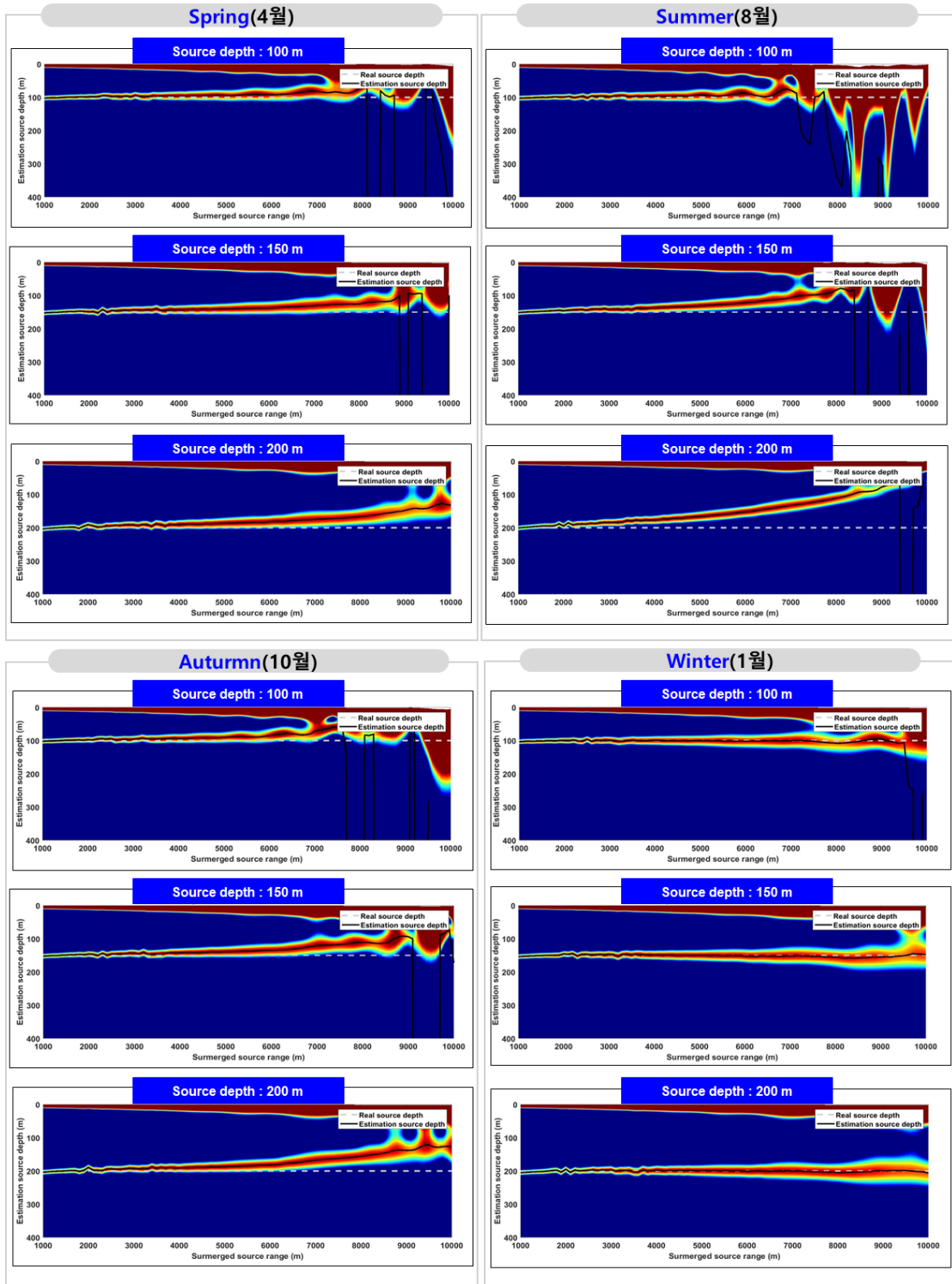


Fig. 9. Source depth estimation result in a modeling environment(Spring, Summer, Autumn, Winter)

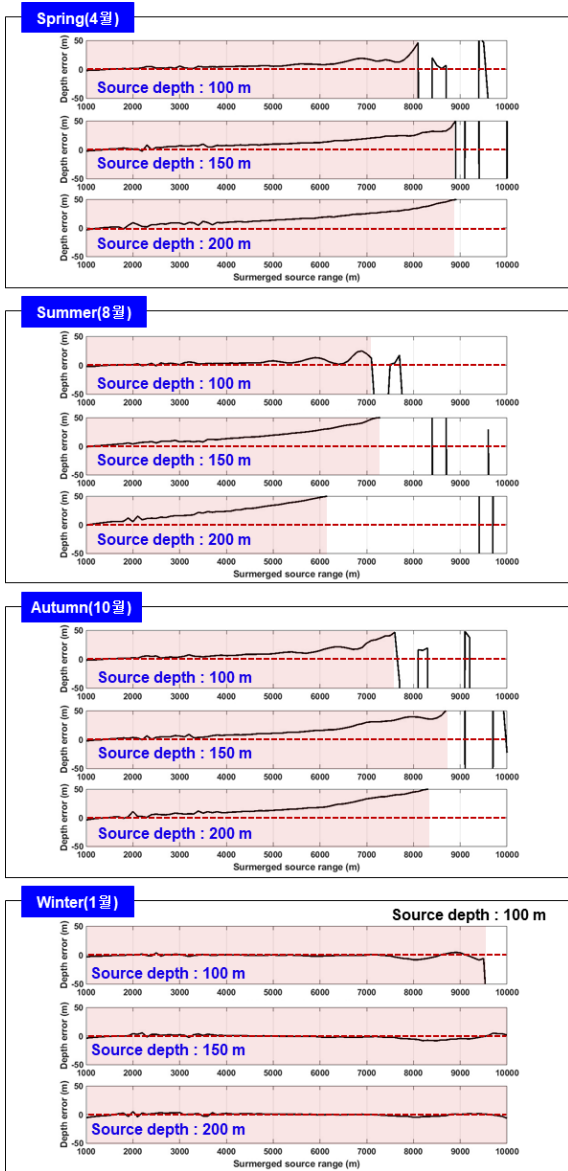


Fig. 10. Source depth estimation range result in a modeling environment(Spring, Summer, Autumn, Winter) using a criterion of tolerance(50 m)

봄(4월)과 가을(10월)철인 경우 수중 음원의 심도(100, 150, 200 m)에 따라 약 8.1~8.9 km의 추정 거리, 여름철인 경우 약 6.2~7.3 km, 겨울철인 경우 약 9.5~10 km의 심도 추정 거리가 도출되었다.

여름철의 낮은 심도 추정 거리는 표층의 높은 음속

의 영향으로 음원 심도 부근에서 음파 하향 굴절의 영향이 크게 나타나며 광대역 간섭 패턴이 불규칙해지는 현상과 원거리에서 직접파 및 해수면 반사파의 굴절로 인하여 수신기 도달각 추정 차이로 인하여 음원 심도 추정에 오차가 발생하게 되었다. 본 연구에서는 고정된 해양환경 정보와 높은 SNR(Signal to Noise Ratio) 환경에서 모델링이 수행되어 입자속도를 이용한 수직 방위 추정의 정확도가 높게 나타났다. 해양환경의 복잡성과 낮은 SNR 환경에서의 수직 방위각 추정의 오차는 음원 심도 추정의 오차를 유발할 수 있다.

향후 연구로는 본 제안 기법과 결과를 기반으로 동해 심해역 해상시험을 수행하고 음원 심도를 추정 및 검증하는 연구를 수행하며, 낮은 SNR 환경에서 수직 방위 오차에 따른 음원 심도 추정 정확도 분석 연구도 수행할 예정이다. 또한, 광대역 간섭 패턴의 간섭 주파수 주기는 음원과 수신기간 수평거리와 음원 심도에 따른 함수로 특정 기울기를 가지는 불변 곡선을 가진다. 따라서 이를 이용하여 음원의 심도뿐만 아니라 음원의 거리까지 추정할 수 있는 기법으로 확장 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소(KRIT)의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-056, 과제명 : 해양생물음 기반 음향탐지 M&S 기법 및 가시화 기법 연구)

References

- [1] B. Nicolas, J. Mars, and J-L. Lacoume, "Source depth estimation using matched field processing and frequency-wavenumber transform," IEEE/MTS Oceans, San Diego, USA, 2003.
- [2] D. Zhai, B. Zhang, F. Li, Y. Zhang, and X. Yang, "Passive source depth estimation in shallow water using two horizontally separated hydrophones," Applied acoustics, Vol. 192, 2022.
- [3] T. C. Yang, "Source depth estimation based on synthetic aperture beamforming for a moving source," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 138, No. 3, pp. 1678-1686,

- 2015.
- [4] E. Conan, J. Bonnel, T. Chonavel, and B. Nicolas, "Source depth discrimination with a vertical line array," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 140, No. 5, EL434, 2016.
- [5] R. Cao, K. Yang, Y. Ma, Q. Yang, and Y. Shi, "Passive broadband source localization based on a Riemannian distance with a short vertical array in the deep ocean," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 145, No. 6, EL567, 2019.
- [6] H. Li, T. Wang, L. Su, X. Guo, C. Wang, and L. Ma, "Passive depth estimation for a narrowband source using a single vector sensor in deep water," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 3, No. 6, p. 066002, 2023.
- [7] K. Yang, L. Xu, Q. Yang, and R. Duan, "Striation-based source depth estimation with a vertical line array in the deep ocean," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 143, No. 1, EL8-12, 2018.
- [8] Y. Liang, Y. Chen, Z. Meng, X. Zhou, and Y. Zhang, "A Deep-Sea Broadband Sound Source Depth Estimation Method Based on the Interference Structure of the Compensated Beam Output," *J. Mar. Sci. Eng.* Vol. 11, No. 11, pp. 1-18, 2023.
- [9] G. P. Kniffin, J. K. Boyle, L. M. Zurk, and M. Siderius, "Performance metrics for depth-based signal separation using deep vertical line arrays," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 139, No. 1, pp. 418-425, 2016.
- [10] W. Kim, C. Cho, J. Park, J. Hahn, and Y. Na, "Effects of Warm Eddy on Long-range Sound Propagation in the East Sea," (in Korean) *J. Acoust. Soc. Kr.*, Vol. 34, No. 6, pp. 455-462, 2015.
- [11] D. Kim, H. Park, J. S. Kim, and J. y. Hahn, "Application of ray-based blind deconvolution to long-range acoustic communication in deep water," (in Korean) *J. Acoust. Soc. Kr.*, Vol. 41, No. 2, pp. 242-253, 2022.
- [12] H. Kim, and J. Choi, "A Study on the Detection Performances of the Integrated Sonar System Operated by Surface Vessel in the Mesoscale Eddy in the Southwestern East Sea," (in Korean) *J. Korea Society for Naval Science & Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 20-45, 2020.
- [13] R. J. Urick, "Principles of Underwater Sound 3rd Edition," McGraw-Hill Book Company, New York, 1983.
- [14] F. Jensen, W. Kuperman, M. Poter and H. Schmidt, "Computational Ocean Acoustics," New York, 1993.
- [15] M. D. Collins, "User's Guide for RAM Versions 1.0 and 1.0p," Technical report, Naval Research Laboratory, Washington, pp. 1-14, 1995.
- [16] F. Jacobsen, "Sound Intensity," In *Springer Handbook of Acoustics*; Rossing, T.D., Ed.; Springer Science + Business Media: New York, NY, USA, Chapter 25, pp. 1053-1075, 2007.
- [17] D. R. Dall'Osto, and P. H. Dahl, "Elliptical acoustic particle motion in underwater waveguides," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 134, No. 1, pp. 109-118, 2013.
- [18] D. R. Dall'Osto, P. H. Dahl, and J. W. Choi, "Properties of the acoustic intensity vector field in a shallow water waveguide," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 131, No. 3, pp. 2023-2035, 2012.
- [19] S. Kim, and J. W. Choi, "Optimal Deployment of Vector Sensor Nodes in Underwater Acoustic Sensor Networks," *Sensors*, Vol. 19, pp. 1-10, 2019.
- [20] J. M. Hovem, T. V. Tronstad, H. E. Karlsen, and S. Lokkeborg, "Modeling Propagation of Seismic Airgun Sound and the Effects on Fish Behavior," *IEEE J. Ocean. Eng.*, Vol. 37, No. 4, pp. 576-588, Jan. 2012.