Journal of the KNST

2026; Vol.9, No.1; pp.224-233

ISSN: 2635-4926 https://doi.org/10.31818/JKNST.2026.3.9.1.224

Check for updates

Received: 2026/02/19
Revised: 2026/02/27
Accepted: 2026/03/07
Published: 2026/03/31

*Corresponding Author:
Yonghoon Ha
Hwangsanbul-ro 1040, Yangchon-myeon, Nonsan-si, Chungcheongnam-do 33021, Republic of Korea
Tel: +82-41-831-5385
Fax: +82-2-748-7588
E-mail: yonghoonha@korea.kr

단일경로의 LFA VDS 인터셉트 신호를 활용한 표적거리 추정 가능성

Feasibility of Target Range Estimation Using Single-Path Intercepted LFA VDS Signals

최민기[1], 정승진[2], 이근화[3], 하용훈[4*]

[1]해군 소령/국방대학교 국방과학학부 무기체계학과 석사 과정
[2]해군 소령/잠수함사령부 나대용함 부장
[3]세종대학교 국방시스템공학과 교수
[4]국방대학교 국방과학학부 무기체계학과 부교수

Minki Choi[1], Seongjin Jeong[2], Keunhwa Lee[3], Yonghoon Ha[4*]

[1]LCDR, ROK Navy/M.S. candidate, Dept. of Defense Science, KNDU
[2]LCDR, ROK Navy/XO, ROKS Na Dae-yong
[3]Professor, Dept. of Defense Systems Engineering, Sejong University
[4]Associate professor, Dept. of Defense Science, KNDU

Abstract

본 연구에서는 저주파 능동 가변심도 소나(LFA VDS)에서 운용되는 장펄스 선형 주파수 변조(LFM) 신호를 인터셉트하였을 때 동일 LFM 스윕 내 두 주파수 성분에서 측정된 수신음압 차이와 흡수계수 차이를 이용하여 송·수신원 간 거리를 추정하는 방안을 제안한다. 본 연구에서 제안한 거리 추정식은 단일 음선 기반으로 모델링하였으며, BELLHOP 모델 기반 음파 전달 수치모의로 유효성을 검증하고 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 민감도 특성을 분석하였다.

This study proposes a method to estimate the source–receiver distance when a long-pulse linear frequency-modulated (LFM) signal used in a low-frequency active variable-depth SONAR (LFA VDS) system is intercepted. The proposed method uses the difference in the received sound pressure at two frequency components within the same LFM sweep and the corresponding difference in absorption coefficients. This distance-estimation formula is modeled based on a single-ray assumption; its validity was verified through acoustic propagation simulations using the BELLHOP model, and its sensitivity characteristics were analyzed using Monte Carlo simulations.

Keywords

거리 추정(Range Estimation),
선형 주파수 변조(Linear Frequency Modulation),
흡수계수(Absorption Coefficient),
저주파 능동 가변심도 소나(LFA VDS)

1. 서론

대잠전에서 잠수함을 탐지하기 위한 음향탐지체계는 선체고정소나(hull-mounted sonar, HMS), 선배열예인소나(towed array sonar, TAS), 디핑소나(dipping sonar), 소노부이(sonobuoy) 등이 있다. 최근에는 기존 음향탐지체계의 한계를 보완하기 위해 미국·프랑스 등 주요 선진국을 중심으로 저주파 능동 가변심도 소나(low-frequency active variable-depth sonar, LFA VDS)의 개발 및 전력화가 가속화되고 있다. 동북아시아 해역에서는 한국 해군이 정조대왕급 이지스 구축함(KDX-III Batch-II)에 LFA VDS를 도입하였고 일본 해상자위대 역시 Asahi급 구축함, Mogami급 호위함 등 신형 함정에 LFA VDS(OQQ-25)를 도입하고 있다[1,2]. 또한 중국 해군도 자체 LFA VDS(H/SJG-311)를 개발하여 Renhai급 구축함, Luyang-I/II/III급 구축함, Jiangkai-II급 호위함, Jiangdao 코르벳함 등 다수의 함정에서 운용 중이다[3]. 특히, 미국 해군대학 중국해양연구소에서는 중국 해군이 2017년 이후 SURTASS와 LFA를 탑재한 Dongjian급 해양정보함을 6척 건조하였다고 보고하였으며 동 함정이 규모와 구성 면에서 미국 해군의 T-AGOS와 유사한 수준을 갖춰 향후 아시아·태평양 해역에서의 잠수함 작전에 상

© 2026 Korea Society for Naval Science & Technology

당한 제약을 초래할 것으로 평가하였다[4]. Table 1에 제시된 바와 같이 LFA VDS는 저주파 송신 및 가변 심도 운용 특성 외에도 상대적으로 현저히 긴 송신펄스를 사용한다는 점에서 기존 HMS와 구분된다. 이러한 펄스 길이의 증가는 펄스 에너지와 정합필터 이득(matched filter gain, MFG)을 증대시켜 탐지거리를 향상시킨다[5]. 그러나 펄스 길이를 과도하게 늘리면 장시간 송신으로 인해 수신 블랭킹(blanking) 구간이 확대될 뿐만 아니라 펄스 길이가 상관 시간(coherence time)을 초과할 경우 상관 손실(coherence loss)에 의해 실효 이득이 감소하므로 HMS에서는 펄스 길이를 연장하는 것이 제한되었다[6]. 반면 LFA VDS는 송신기와 수신기를 분리한 양상태(bi-static)/다중상태(multi-static) 구성을 채택하여 장시간 송신에 따른 수신 블랭킹 문제를 해결하였고 저주파 운용을 통해 상대적으로 긴 상관 시간을 확보함으로써 장펄스 운용이 가능해졌다[7,8].

한편, LFA VDS는 설계상으로 연속파(continuous wave, CW)와 주파수 변조(frequency modulation, FM) 파형을 모두 송신할 수 있으나, 장펄스 송신에 따른 거리 분해능 저하 문제를 보완하기 위해 Fig. 1과 같이 LFM sweep 방식을 주로 사용한다[13,14]. 또한 현재 공개된 자료에 따르면 LFA VDS의 송신대역폭은 HMS의 송신대역폭과 유사한 수준으로 확인되었으나, 광대역 및 고해상도 신호 설계가 LFA VDS 탐지성능 향상의 핵심 요소로 인식되면서 향후 송신대역폭을 수 kHz 수준으로 확대하기 위한 연구·개발이 지속되고 있다[15-17].

Fig. 1은 upsweep의 LFA VDS 신호의 스펙트로그램의 예를 보여준다. LFM 신호를 사용했으므로 시간에 대해 주파수가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이론적인 환경에서는 LFM 신호의 각 주파수별

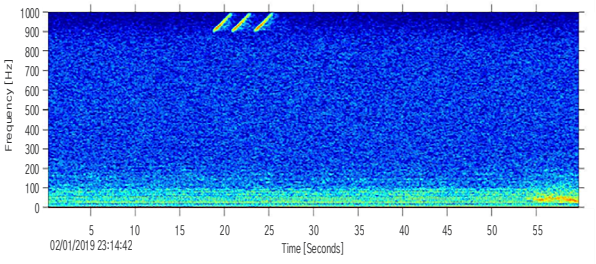

Fig. 1. Time-frequency spectrogram of LFA VDS signal from reference [14]

신호의 파워는 동일한 크기를 가진다. 그러나 실제로는 수중의 주파수 의존적인 흡수손실로 인해 실제 수신되는 신호는 주파수에 따라 파워가 상이하게 나타난다. 특히 장펄스 LFM 신호일수록 밴드폭이 크기 때문에 펄스의 시점과 종점에 해당하는 주파수에서 수신파워의 차이가 더욱 커진다. 흡수손실은 주파수뿐만 아니라 거리에 대한 함수이기도 하다. 만약 수신 플랫폼인 잠수함에서 위와 같은 신호를 인터셉트했다고 가정할 때, 주파수별 흡수손실의 차이를 이용하면 역으로 송신 플랫폼과의 거리를 추정할 수도 있을 것이다.

본 연구에서는 단일 경로의 LFA VDS 신호의 전파 특성을 활용하여, 수신 플랫폼에서 LFA VDS 신호를 인터셉트했을 때 송신 플랫폼과의 거리를 추정할 수 있는 가능성을 분석하였다.

2. 관련 연구

수중에서 음파의 전달손실은 기하학적 확산손실, 매질에 의한 흡수손실 등으로 구성된다. 이 중 흡수손실은 흡수계수(absorption coefficient, α)에 따른 단위 거리당 감쇠율로 정의할 수 있으며, 흡수계수(α)는 Thorp 경험식(1967)과 Fisher &

Table 1. Comparison of LFA and HMS specifications from references [9-12]

Type	SQS-56 (HMS)	LFATS (Lightweight LFA)	Sea Lancer Mk.2 (LFA)	CAPTAS-4 (LFA)
Deployment depth (m)	Keel-mounted	15 ~ 300	50 ~ 200	≤ 250
Operating frequency (kHz)	6.7, 7.5, 8.4	1.2 ~ 1.6	1.5 ~ 3.5	0.9 ~ 2.1
Transmit bandwidth (Hz)	400, 800, 1600	50, 100, 300	20% of the operating frequency	≤ 640
Source level (dB re 1 μPa)	215	219(Omni), 221(Sector)	Not disclosed	Not disclosed
Pulse length (s)	0.005 ~ 1.6	0.039 ~ 10	≤ 16	1 ~ 16
Pulse type	CW, FM, Mixed	CW, FM, wave-train, multi-pulse	CW, FM, waveform configurable	CW, FM, Mixed

Simmons 경험식(1977)을 거쳐 Francois & Garrison 경험식(1982)으로 다음과 같이 정립되었다[18,19].

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2. \quad (1)$$

흡수계수는 특정 주파수 대역에서 우세한 화학적 이완(relaxation) 과정의 영향이 나타나는데, 식 (1)과 같이 붕산(boric acid)과 황산마그네슘($MgSO_4$)의 이완, 그리고 물의 점성 감쇠항의 합으로 구성된다. 여기서 각 항의 A_1, A_2, A_3는 비례계수, P_1, P_2, P_3는 압력 보정계수, f_1, f_2는 완화주파수로 모두 환경 파라미터(수온, 염분, pH, 심도)에 따라 변화한다. 따라서 동일한 해양환경에서는 흡수계수는 주파수에 의한 함수로 표현된다.

이러한 흡수손실의 주파수 의존적인 특성은 다양한 분야에서 폭넓게 응용되어 왔다. 과거에는 Churnside et al.의 연구와 같이 흡수계수를 통해 환경 파라미터를 추정하는 연구가 주를 이루었으나, 최근에는 흡수계수를 송·수신기 간의 거리를 추정하는 데 활용하는 연구가 진행된 바 있다[20]. 대표적으로 Houégnigan et al.은 흡수손실로 인한 수신음압의 진폭 스펙트럼 변화를 머신러닝으로 학습하여 송·수신기 간 거리를 추정하는 방안을 제시하였다[21]. 또한 O'Neill은 단일 하이드로폰 기반 자율무인잠수정들 간 일정한 거리를 유지하기 위해 두 주파수의 흡수계수 차이와 수신음압 차이를 거리 추정에 활용하는 방안을 제시하였다[22]. 다만, 타국가의 LFA VDS 신호에 대한 송신음압 정보와 관련 데이터가 부족한 현실적 제약으로 인해 현재 단계에서 앞선 두 연구의 거리추정 방안을 우리 해군에 적용하기에는 한계가 있다.

3. 거리 추정 방법

3.1 단일 음선이 수신된 경우의 거리 추정

소나에 단일 경로로 하나의 음선이 수신된 경우 주파수 영역에서의 수신음압 진폭 스펙트럼 $P(f)$는 신호 스펙트럼 $S(f)$와 잡음 스펙트럼 $n(f)$의 합으로 식 (2)와 같이 표현된다[23].

$$P(f) = \underbrace{\frac{A(f)}{r} e^{jkr} e^{-\alpha(f) r}}_{S(f)} + n(f). \quad (2)$$

여기서, $S(f)$는 송신음압 진폭 스펙트럼 $A(f)$에 기하학적 확산손실 $1/r$, 거리에 따른 위상 변화 e^{jkr}, 흡수손실 $e^{-\alpha(f) r}$이 적용된 수신 신호 성분의 스펙트럼이다.

식 (2)에 복소켤레 $P^*(f)$를 곱한 크기 제곱 $|P(f)|^2$는 식 (3)과 같이 표현된다. 이때 $|S(f)|^2$은 위상 성분이 소거되어 식 (4)와 같다[24].

$$|P(f)|^2 = |S(f)|^2 + |n(f)|^2 + S(f) n^*(f) + S^*(f) n(f). \quad (3)$$

$$|S(f)|^2 = \frac{|A(f)|^2}{r^2} e^{-2\alpha(f) r}. \quad (4)$$

여기서, 식 (3)을 앙상블 평균(ensemble mean)하면 $n(f)$가 평균이 0인 복소 가우시안 분포를 따르므로 식 (5)와 같이 정리된다[25].

$$\langle |P(f)|^2 \rangle = \frac{\langle |A(f)|^2 \rangle}{r^2} e^{-2\alpha(f) r} + \langle |n(f)|^2 \rangle. \quad (5)$$

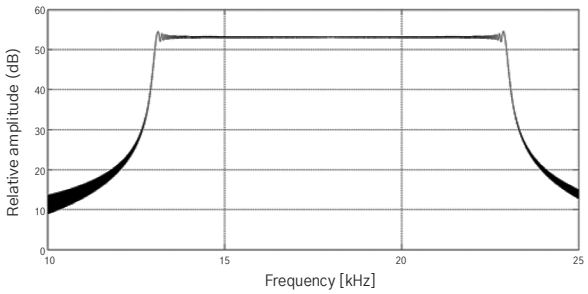

Fig. 2. Amplitude spectrum of LFM waveform from reference [28]

능동소나에서 사용하는 LFM 신호는 파형 왜곡 억제를 위해 주파수 응답을 보정하여 Fig. 2와 같이 $A(f)$가 균일한 스펙트럼을 유지하도록 설계된다[26]. 마찬가지로 LFA VDS에도 이와 같은 평탄화 설계가 동일하게 적용된다[27]. 따라서 동일한 LFM sweep 구간에서는 각 주파수의 $A(f)$가 동일하다고 가정할 수 있으므로 sweep 내부의 임의의 두 주파수 f_1, f_2에 대한 $|P(f)|^2$는 식 (6), (7)로 나타낼 수 있다.

$$\langle |P(f_1)|^2 \rangle = \frac{\langle |A(f)^2| \rangle}{r^2} e^{-2\alpha(f_1)r} + \langle |n(f_1)|^2 \rangle. \quad (6)$$

$$\langle |P(f_2)|^2 \rangle = \frac{\langle |A(f)^2| \rangle}{r^2} e^{-2\alpha(f_2)r} + \langle |n(f_2)|^2 \rangle. \quad (7)$$

여기서 식 (6)을 식 (7)로 나누면 식 (8)과 같이 유도된다. 최종적으로 식 (8)의 양변에 자연로그를 취한 후 거리(r)에 대하여 정리하면 식 (9)와 같이 거리 추정식이 성립한다.

$$\frac{\langle |P(f_1)|^2 \rangle - \langle |n(f_1)|^2 \rangle}{\langle |P(f_2)|^2 \rangle - \langle |n(f_2)|^2 \rangle} = e^{-2r\{\alpha(f_1) - \alpha(f_2)\}}. \quad (8)$$

$$r = \frac{1}{2(\alpha_{f_2} - \alpha_{f_1})} \ln \frac{\langle |P(f_1)|^2 \rangle - \langle |n(f_1)|^2 \rangle}{\langle |P(f_2)|^2 \rangle - \langle |n(f_2)|^2 \rangle}. \quad (9)$$

그러므로 단일 경로로 하나의 음선이 수신된 경우 수신 플랫폼에서는 식 (9)에 의거하여 임의의 두 주파수 f_1, f_2에 대한 수신음압 세기, 잡음 세기, 흡수계수만으로 송·수신기 간의 거리를 추정할 수 있다.

3.2 다중 음선이 수신된 경우의 거리 추정

반면, 소나에 다중 경로로 다수의 음선이 수신된 경우의 수신음압 진폭 스펙트럼 $P(f)$는 고유 음선 성분들을 합성한 결과인 식 (10)으로 정의된다.

$$P(f) = \sum_{i=1}^{n} \frac{A(f)}{r_i} \cdot e^{-j(w \cdot \tau_i + \phi_i)} \cdot e^{-\alpha(f) \cdot r_i} + n(f). \quad (10)$$

여기서 r_i는 i번째 음선의 전달거리, τ_i는 i번째 음선의 도달시간, ϕ_i는 i번째 음선의 위상 천이, w는 각주파수를 의미한다[29].

단일 경로로 단일 음선이 수신된 경우와 달리, 다중 경로로 다수의 음선이 수신된 경우에는 $<|P(f)|^2>$의 신호항이 비상관항과 상관항으로 구분되어 식 (11)과 같이 표현된다. 여기서 비상관항은 각 음선의 음압 세기의 합이며, 상관항은 음선 간 상호 간섭으로 인해 발생하는 음압 세기 변화의 합이다[30].

$$\langle |P(f)|^2 \rangle = \sum_{i=1}^{n} \frac{\langle |A(f)|^2 \rangle}{r_i^2} e^{-2\alpha(f) r_i} + \langle |n(f)|^2 \rangle + 2 \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=i+1}^{n} \frac{\langle |A(f)|^2 \rangle}{r_i \cdot r_j} e^{-\alpha(f)(r_i + r_j)} \cos\{\omega(\triangle\tau) + \triangle\phi\}. \quad (11)$$

따라서 이러한 상관항의 영향으로 인해 단일 경로 환경에서와 달리 다중 경로 환경에서는 $<|P(f_i)|^2>$를 $<|P(f_j)|^2>$로 나누어도 공통 인수가 소거되지 않으므로 식 (9)와 같은 거리 추정식의 직접적인 적용이 제한된다. 본 연구는 기본적으로 배열 신호처리 등을 활용하여 수중에서 단일 경로의 신호를 분리할 수 있다는 전제하에 연구를 수행하였다. 단일 경로를 분리할 수 없다면 식 (11)의 우변의 세 번째 항의 오차항의 역할을 하게 되어 거리 추정의 정확도가 낮아지게 된다.

4. 시뮬레이션 및 결과

4.1 시뮬레이션 구성

LFA VDS는 군사보안 목적상 공개적인 실해역 실험이 제한적이며 작전 중 수집된 음향데이터의 공개도 제한된다. 따라서 본 연구에서는 음선 기반의

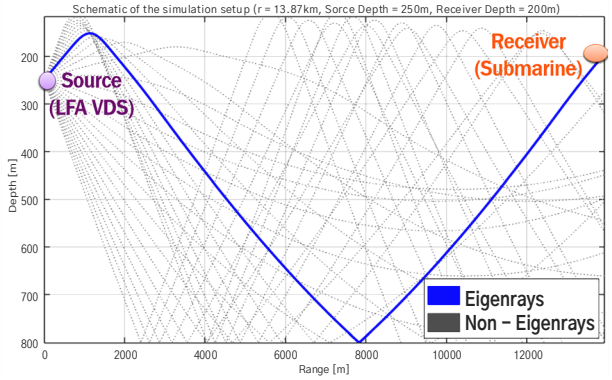

Fig. 3. Schematic of the simulation setup

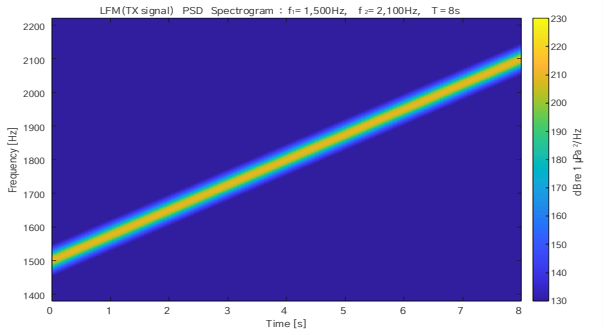

Fig. 4. Spectrogram of the simulated LFM signal

BELLHOP 음파전달모델을 활용한 수치 기반 시뮬레이션을 통해 단일 경로 환경에서 제안된 거리 추정식 식 (9)의 유효성을 검증하였다.

시뮬레이션 절차는 다음과 같다. 우선 Fig. 3와 같이 송신원(LFA VDS)에서 LFM 신호를 생성한 뒤 푸리에 변환(Fourier transform)을 적용하여 송신음압 진폭 스펙트럼 $A(f)$를 산출한다. 다음으로 sweep 대역폭 양 끝단 주파수 f_1, f_2에서 산출한 수신원(잠수함)에서의 도달정보(도달시간, 진폭)와 경로적분 흡수손실에 따른 진폭 감쇠항을 결합하여 주파수응답 $H(f)$를 구성한다. 이후 송신음압 진폭 스펙트럼 $A(f)$와 주파수응답 $H(f)$를 합성하여 수신음압 진폭 스펙트럼 $P(f)$를 구하고 $<|P(f)|^2>$를 산출한다. 최종적으로 산출된 $<|P(f)|^2>$과 동일 주파수 대역의 $<|n(f)|^2>$을 식 (9)에 대입하여 거리를 추정하고 이를 기준거리와 비교한다. 여기서 LFM 신호는 Table 1의 제원에 준하여 Fig. 4와 같이 송신음압 221 dB re 1 μPa at 1 m, 중심 주파수 1800 Hz, 신호 대역폭 600 Hz, 펄스 길이 8 s로 구현하였고 송신각은 공개된 유사장비(저주파 디핑소나, 액티브 소나)의 송신각을 참고하여 ± 15°로 설정하였다[31,32].

시뮬레이션은 해역·계절별로 4가지 환경조건(동해-여름/겨울, 서해-여름/겨울)으로 구분하여 수행하였다.

과거 실측 데이터를 기반으로 Tables 2, 3의 수심별 물성 및 음속 프로파일을 적용하였고, 퇴적층의 지음향 파

Table 2. Depth-dependent seawater properties and sound-speed profiles of the East Sea from References [35-37]

Depth (m)	Summer				Winter			
	Temperature (℃)	Salinity (‰)	pH	Sound speed (m/s)	Temperature (℃)	Salinity (‰)	pH	Sound speed (m/s)
0	28.971	31.960	8.200	1540.1	9.437	34.216	8.200	1486.6
10	27.945	32.391	8.199	1538.4	9.334	34.211	8.199	1486.4
20	26.257	33.252	8.198	1535.7	9.230	34.206	8.198	1486.1
30	23.403	34.072	8.196	1529.9	9.127	34.202	8.196	1485.9
50	17.158	33.860	8.194	1512.8	9.026	34.196	8.194	1485.9
70	16.124	34.271	8.191	1510.5	8.965	34.194	8.191	1486.0
90	15.512	34.473	8.189	1509.1	8.802	34.199	8.189	1485.7
150	4.035	34.210	8.181	1468.1	5.103	34.206	8.181	1472.3
200	1.919	34.196	8.175	1459.8	2.457	34.212	8.175	1461.9
300	1.173	34.211	8.163	1458.1	1.006	34.212	8.163	1457.2
400	0.888	34.217	8.150	1458.5	0.714	34.217	8.150	1457.5
500	0.727	34.221	8.138	1459.4	0.619	34.220	8.138	1458.7
600	0.602	34.224	8.125	1460.5	0.532	34.222	8.125	1460.0
700	0.506	34.226	8.113	1461.7	0.487	34.223	8.113	1461.4
800	0.440	34.228	8.100	1463.1	0.459	34.223	8.100	1463.0

Table 3. Depth-dependent seawater properties and sound-speed profiles of the West Sea from References [37-39]

Depth (m)	Summer				Winter			
	Temperature (℃)	Salinity (‰)	pH	Sound speed (m/s)	Temperature (℃)	Salinity (‰)	pH	Sound speed (m/s)
0	28.306	30.747	8.100	1537.2	7.200	32.342	8.100	1476.0
10	28.133	30.821	8.100	1537.0	7.132	32.362	8.100	1475.9
20	23.881	31.425	8.100	1527.8	7.092	32.362	8.100	1475.9
30	18.178	32.581	8.100	1513.8	7.082	32.362	8.100	1476.1
50	13.107	32.979	8.100	1498.7	7.055	32.364	8.100	1476.3
70	11.808	32.914	8.100	1494.6	7.054	32.361	8.100	1476.6

라미터(압축파 음속, 감쇠계수, 밀도)는 동해 1450 m/s, 0.069 dB/m/kHz, 1.331 g/cm^3, 서해 1573 m/s, 0.08 dB/m/kHz, 1.85 g/cm^{3}로 가정하였다[33,34]. 또한 송·수신심도는 해역별 수심을 고려하여 각각 동해 250 m/200 m, 서해 50 m/35 m로 설정하였다. 그리고 배경소음 준위는 reference [40]의 한반도 주변해역 배경소음 준위 근사식을 기반으로 주파수별 잡음을 적용하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

해역·계절별 거리추정식 정확도는 주 음선 성분의

Table 4. Range-estimation results of the East Sea

Summer						Winter					
Reference range (km)	$<\|P(f_1)\|^2>$ (Pa^2/Hz)	$<\|P(f_2)\|^2>$ (Pa^2/Hz)	Estimated range (km)	Error (km)	RMSE (km)	Reference range (km)	$<\|P(f_1)\|^2>$ (Pa^2/Hz)	$<\|P(f_2)\|^2>$ (Pa^2/Hz)	Estimated range (km)	Error (km)	RMSE (km)
2.0	6.742e+00	6.614e+00	2.34	**0.34**	0.38	2.0	8.476e+00	8.318e+00	2.30	**0.30**	0.46
4.5	7.801e−01	7.501e−01	4.81	**0.31**		4.3	1.509e−01	1.450e−01	4.89	**0.59**	
6.0	4.496e−04	4.277e−04	6.04	**0.04**		6.1	3.552e−04	3.376e−04	6.14	**0.04**	
7.9	1.884e−03	1.762e−03	8.17	**0.27**		8.0	4.099e−04	3.827e−04	8.36	**0.36**	
9.8	2.155e−03	1.993e−03	9.63	**0.17**		10.0	3.677e−04	3.387e−04	10.00	**0.00**	
11.8	1.413e−03	1.285e−03	11.62	**0.18**		11.8	2.982e−05	2.678e−05	12.13	**0.33**	
13.9	2.741e−03	2.453e−03	13.59	**0.31**		14.0	2.150e−03	1.921e−03	13.82	**0.18**	
16.2	5.355e−03	4.712e−03	15.69	**0.51**		16.0	5.640e−03	4.966e−03	15.62	**0.38**	
18.7	3.864e−03	3.332e−03	18.16	**0.54**		18.0	1.256e−02	1.091e−02	17.23	**0.77**	
21.1	6.936e−06	5.673e−06	20.41	**0.69**		20.0	6.827e−03	5.839e−03	19.19	**0.81**	

*Summer: $\alpha(f_1)$ = 0.1134 dB/km(0.013056 Np/km), $\alpha(f_2)$ = 0.1488 dB/km(0.017132 Np/km), $<|n(f_1)|^2>$ = 7.181e−07 Pa^2/Hz, $<|n(f_2)|^2>$ = 4.086e−07 Pa^2/Hz
*Winter: $\alpha(f_1)$ = 0.1128 dB/km(0.012985 Np/km), $\alpha(f_2)$ = 0.1481 dB/km(0.017056 Np/km), $<|n(f_1)|^2>$ = 7.051e−07 Pa^2/Hz, $<|n(f_2)|^2>$ = 4.015e−07 Pa^2/Hz

Table 5. Range-estimation results of the West Sea

Summer						Winter					
Reference range (km)	$<\|P(f_1)\|^2>$ (Pa^2/Hz)	$<\|P(f_2)\|^2>$ (Pa^2/Hz)	Estimated range (km)	Error (km)	RMSE (km)	Reference range (km)	$<\|P(f_1)\|^2>$ (Pa^2/Hz)	$<\|P(f_2)\|^2>$ (Pa^2/Hz)	Estimated range (km)	Error (km)	RMSE (km)
2.0	1.690e+01	1.659e+01	1.95	**0.05**	0.87	2.0	3.428e+00	3.372e+00	2.10	**0.10**	0.14
4.0	5.662e+00	5.465e+00	3.81	**0.19**		4.0	3.572e+00	3.463e+00	4.05	**0.05**	
6.0	1.266e+00	1.201e+00	5.65	**0.35**		6.0	7.862e−01	7.505e−01	6.02	**0.02**	
8.0	7.013e−01	6.532e−01	7.64	**0.36**		8.0	4.475e−01	4.208e−01	7.97	**0.03**	
10.0	1.715e+00	1.568e+00	9.65	**0.35**		10.0	1.269e−01	1.175e−01	9.94	**0.06**	
12.0	5.635e−01	5.078e−01	11.18	**0.82**		12.0	8.602e−02	7.848e−02	11.91	**0.09**	
14.0	2.127e−01	1.886e−01	12.92	**1.08**		14.0	1.577e−01	1.417e−01	13.85	**0.15**	
16.0	1.175e−01	1.025e−01	14.65	**1.35**		16.0	3.865e−02	3.421e−02	15.84	**0.16**	
18.0	1.912e−01	1.629e−01	17.26	**0.74**		18.0	6.847e−02	5.971e−02	17.77	**0.23**	
20.0	1.027e−01	8.669e−02	18.27	**1.73**		20.0	1.905e−01	1.636e−01	19.72	**0.28**	

*Summer: $\alpha(f_1)$ = 0.1037 dB/km(0.011942 Np/km), $\alpha(f_2)$ = 0.1441 dB/km(0.016592 Np/km), $<|n(f_1)|^2>$ = 1.041e−06 Pa^2/Hz, $<|n(f_2)|^2>$ = 5.902e−07 Pa^2/Hz
*Winter: $\alpha(f_1)$ = 0.1052 dB/km(0.012116 Np/km), $\alpha(f_2)$ = 0.1387 dB/km(0.015970 Np/km), $<|n(f_1)|^2>$ = 8.386e−07 Pa^2/Hz, $<|n(f_2)|^2>$ = 4.773e−07 Pa^2/Hz

수신음압을 토대로 추정거리를 산출하고 이를 기준거리와 비교하여 검증하였으며 결과는 Tables 4, 5와 같다. 이때 정확도 검증은 2 km 간격으로 수행되었으며 해당 지점에 도달한 음선이 없는 경우에는 음선이 도달한 최근접 지점을 기준으로 결과를 산출하였다.

거리추정 결과의 평균제곱근 오차(root mean square error, RMSE)는 0.14~0.87 km로 전반적으로 양호하였다. 오차의 주된 원인 중 첫 번째는 흡수계수 계산에 사용된 평균 해양환경 파라미터 값이 실제 경로별 해양환경을 정확히 반영하지 못한 데 있다. 이에 따라 수심별 물성과 음속 프로파일 변동이 급격한 서해-여름의 RMSE가 0.87 km로 가장 컸고 수심별 물성·음속 프로파일 변동이 미미한 서해-겨울의 RMSE가 0.14 km로 가장 작았다. 동해-여름과 동해-겨울의 RMSE는 각각 0.38 km, 0.46 km로 유의미한 차이는 없었다. 두 번째 오차 원인은 기준거리가 송·수신기 간 수평거리인 반면 식 (9)는 실제 음파가 이동한 음선거리를 기반으로 거리를 산출하기 때문에 두 거리 간 경로 차이가 발생하는 데 있다. 이에 따라 거리가 증가함에 따라 오차가 누적되어 전반적으로 10 km 이하 거리에서는 500 m 이내의 오차를 나타내었고 10~20 km 거리에서는 서해-여름의 경우 2 km 이내, 그 외 환경에서는 1 km 이내의 오차를 나타내었다.

4.3 민감도 평가

본 연구에서는 단일 경로 환경에서 신호 대역폭 및 펄스 길이 변화에 따른 식 (9) 거리추정식의 민감도를 평가하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 적용하였다. 불확실성 오차는 $<|P(f_1)|^2>$, $<|P(f_2)|^2>$에 각각 상대오차 5%를 적용하였고 두 변수의 강한 상관관계를 고려하여 상관계수는 0.75로 설정하였다. 민감도 분석의 시뮬레이션 환경은 동해-여름과 동일하게 모델링한 후 대역폭을 600, 1200, 1800 Hz로, 펄스 길이를 1, 8, 16 s로 변화시키며 결과를 비교하였다. 각각의 경우에 대해 기준거리 4 km 간격(해당 지점에 도달한 음선이 없는 경우에는 최근접 거리에서 산출)으로 몬테카를로 시뮬레이션을 5000회씩 반복 수행하였으며, 그 결과는 Tables 6, 7과 같다.

신호 대역폭이 600 Hz일 때 편향(bias)과 표준편차(standard deviation, SD)의 절대값 평균은 각각 0.40 km, 4.39 km로 나타났으며 표준편차의 영향으로 인해 RMSE도 4 km 이상으로 산출되었다. 한편, 신호 대역폭이 600 Hz에서 3배 증가할 때 평균적으로 편향이 0.05 km 만큼 개선되었고 표준편차도

Table 6. Comparison of range-estimation sensitivity to frequency bandwidth variations

Reference range (km)	Frequency Bandwidth (kHz)	E[r] (km)	bias (km)	SD[r] (km)	RMSE (km)
4.5	0.6 (1.5 ~ 2.1)	4.78	+0.28	**4.31**	**4.32**
7.9		8.14	+0.24	**4.31**	**4.32**
11.8		11.59	−0.21	**4.31**	**4.32**
16.2		15.65	−0.55	**4.31**	**4.34**
21.1		20.36	−0.74	**4.73**	**4.79**
4.5	1.2 (1.2 ~ 2.4)	4.84	+0.34	**2.09**	**2.12**
7.9		8.22	+0.32	**2.09**	**2.12**
11.8		11.70	−0.10	**2.09**	**2.10**
16.2		15.79	−0.41	**2.09**	**2.13**
21.1		20.52	−0.58	**2.69**	**2.75**
4.5	1.8 (0.9 ~ 2.7)	4.84	+0.34	**1.33**	**1.37**
7.9		8.21	+0.31	**1.33**	**1.37**
11.8		11.71	−0.09	**1.33**	**1.33**
16.2		15.81	−0.39	**1.33**	**1.38**
21.1		20.50	−0.60	**2.58**	**2.64**

Table 7. Comparison of range-estimation sensitivity to pulse length variations

Reference range (km)	Pulse length (s)	E[r] (km)	bias (km)	SD[r] (km)	RMSE (km)
4.5	1	5.82	**+1.32**	4.31	**4.51**
7.9		9.26	**+1.36**	4.31	**4.52**
11.8		12.49	**+0.69**	4.31	**4.36**
16.2		16.78	**+0.58**	4.31	**4.35**
21.1		21.48	**+0.38**	5.12	**5.13**
4.5	8	4.76	**+0.26**	4.31	**4.32**
7.9		8.20	**+0.30**	4.31	**4.32**
11.8		11.43	**−0.37**	4.31	**4.33**
16.2		15.71	**−0.49**	4.31	**4.34**
21.1		20.42	**−0.68**	4.88	**4.93**
4.5	16	4.66	**+0.16**	4.31	**4.31**
7.9		8.11	**+0.21**	4.31	**4.32**
11.8		11.35	**−0.45**	4.31	**4.33**
16.2		15.64	**−0.56**	4.31	**4.35**
21.1		20.36	**−0.74**	4.72	**4.78**

2.81 km 만큼 개선되어 RMSE가 1~2 km 수준으로 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 신호 대역폭이 넓어질수록 두 주파수의 흡수계수 차이(△α)가 뚜렷하여 수신음압의 미소 오차가 거리로 환산될 때의 분산이 감소하기 때문이다. 이러한 결과는 앞서 서론에서 언급한 바와 같이 LFA VDS 발전 추세에 따라 향후 송신 신호 대역폭이 확장되면 식 (9)에 의한 거리 추정이 보다 안정적으로 수행될 수 있음을 시사한다. 한편, 펄스 길이가 1 s에서 16배 증가할 때 평균적으로 편향이 0.44 km 만큼, 표준편차는 0.08 km 만큼 소폭 개선되었으나, 펄스 길이가 8 s에서 16 s로 증가하였을 때는 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 이는 시스템 상 각 주파수에서의 $<|P(f)|^2>$를 안정적으로 측정할 수 있는 수준의 펄스 길이 이상에서는 펄스 길이가 증가함에 따른 거리추정식 정확도 개선이 제한적임을 나타낸다.

5. 결론

잠수함이 LFA VDS 송신함의 위치를 조기에 정확히 추정하는 것은 무기체계(어뢰, 유도탄)의 명중률을 대폭 향상시킬 뿐만 아니라 잠수함이 선제적으로 공격·회피에 유리한 위치로 기동할 수 있도록 하여 잠수함의 생존력을 크게 향상시킬 수 있다. 이를 위해 본 연구는 수신 플랫폼(잠수함)에서 인터셉트한 LFM 신호의 두 주파수 성분에서 측정된 수신음압과 흡수계수 차이를 기반으로 송신 플랫폼과의 거리를 추정할 수 있는 방안을 제시하고 이를 BELLHOP 모델 기반 음파 전달 수치모의를 통해 검증하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 거리추정 방법은 해역·계절에 관계없이 비교적 원거리에서도 유효한 결과를 보여준다. 또한, 본 연구의 거리추정 방법은 기존 시스템 외 추가적인 시스템 개발을 요구하지 않으며 LFA VDS 송신신호에 대한 사전정보 획득이 제한되는 상황에서도 거리를 추정할 수 있다는 점에서 운용자에게 보다 유용한 방법이 될 것으로 기대된다.

그러나 다중 경로를 통해 다수의 음선이 수신된 경우에는 제안된 식을 적용하는 데 제약이 있으므로 이를 보완할 수 있는 방안에 대한 후속 연구가 요구된다. 동해에서는 다중 경로로 동시에 다수의 음선을 수신하는 경우가 드물게 발생하므로 운용자가 이상치(outlier)를 배제함으로써 식 (9) 거리추정식을 용이하게 적용할 수 있을 것이다. 반면, 서해에서는 다중 경로로 다수의 음선을 수신하는 상황이 빈번하게 발생하므로 다중음선으로부터 단일음선을 구분하는 기법 적용이 선행되어야만 식 (9) 거리추정식 적용이 가능할 것으로 예상된다. 현재로서는 음선 간 도달시간 차이에 기반하여 주 음선을 식별하고 이를 거리추정에 적용하는 것만이 이러한 한계를 보완할 수 있는 가장 현실적인 방안이다. 그러나 현재 곡면배열소나 등 고각 정보를 획득할 수 있는 다양한 종류의 음향탐지체계가 개발되고 있으며, 신호처리적으로도 압축센싱을 비롯한 초해상도 배열 신호처리 기법이 개발되고 있다. 또한 고각 정보를 활용해 다중음선으로부터 단일음선을 추출하는 연구도 병행되고 있다[41,42]. 그러므로 향후에는 고각 정보를 기반으로 한 단일음선 추출 방법과 본 거리추정 방법을 결합하여 다중 경로 환경에서도 거리추정의 신뢰도와 정밀도를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

[1] Republic of Korea Navy and Defense Acquisition Program Administration, 'Launch of Aegis Destroyer ROKS Jeongjo the Great (KDX-III Batch-II) (in Korean) [Joint Press Release],' 2022.
[2] Joon-Hyung Bae, 'The Analysis on Japan's New Maritime Strategy and the Development of Its Naval Forces – Focusing on Japan's Countermeasure to China's Pursuing of Maritime Hegemony – (in Korean),' STRATEGY 21, VOL. 19, NO. 2, 2016, pp. 5-36.
[3] D. G. Kim, 'A Study on Modernization Trends and Operational Strategy of China's Submarines and Underwater Weapons Systems (in Korean),' Korea Maritime Security Review, VOL. 5, NO. 2, 2022, pp. 1-27.
[4] D. Thorne, China's T-AGOS: The Dongjian-Class Ocean Surveillance Ship, Newport, RI: China Maritime Studies Institute, U.S. Naval War College, China Maritime Report No. 36, 2024.
[5] S. G. Schock & J. Wulf, 'Buried Object Scanning Sonar for AUVs,' in proceedings of OCEANS 2003 MTS/IEEE, San Diego, CA, September 2003, pp. 494-499.
[6] S. Lourey and J. Lau, 'Investigation of Temporal Coherence and Related Issues During the Littoral Continuous Active Sonar 2016 Trial,' in proceedings of Acoustics 2019, 2019, pp. 1-11.
[7] Wonjun Yang, Dongwook Kim, Dae Hyeok Lee, Jee Woong Choi, & Su-Uk Son, 'Sonar Detection Performance Analysis Considering Bistatic Target Strength (in Korean),' The Journal

of the Acoustical Society of Korea, VOL. 43, NO. 3, 2024, pp. 305–313.
[8] A. A. Lunkov & V. G. Petnikov, 'The Coherence of Low-Frequency Sound in Shallow Water in the Presence of Internal Waves,' Acoustical Physics, VOL. 60, 2014, pp. 61–71.
[9] J. Marszal, J. Schmidt, R. Salamon, L. Kilian, A. Raganowicz, K. Zachariasz, Z. Ostrowski, A. Jedel, M. Rudnicki, & T. Sidorko, 'Modernization of ASW Sonar SQS-56 at Gdansk University of Technology,' Hydroacoustics, VOL. 13, 2010, pp. 191–196.
[10] L3Harris Technologies, Inc., Low-Frequency Active Towed Sonar (LFATS) [Brochure], 2021. https://www.l3harris.com/ (accessed 2025.10.30.)
[11] Ultra Maritime, Sea Lancer (2nd Gen) High Performance Low Frequency Active & Passive Sonar in a Single Tow [Brochure], 2021. https://www.ultra.group/ (accessed 2025.10.30.)
[12] Advanced Acoustic Concepts, Combined Active and Passive Towed Array Sonar (CAPTAS) [Brochure], 2013. https://www.drs.com/ (accessed 2025.10.30.)
[13] S. Jespers, B. Juhel, B. Chalindar, X. Cristol, J. Dydebal, E. J. Eidem, S. Ivansson, R. van Vossen, M. A. Anissine, B. L. Andersson, F. P. A. Benders, M. E. G. D. Colin, G. K. Olsen, & J. Pihl, 'Rapid Environment Assessment of Sea Bottom Parameters Using an Operational Active Low-Frequency Sonar,' in proceedings of 11th European Conference on Underwater Acoustics (ECUA), 2012, pp. 1516–1523.
[14] M. A. Rafter, J. S. Trickey, A. C. Rice, M. Merrifield, B. J. Thayre, E. O'Neill, S. M. Wiggins, S. Baumann-Pickering, K. E. Frasier, & J. A. Hildebrand, 'Passive Acoustic Monitoring for Marine Mammals in the Jacksonville Range Complex, June 2017–2019,' Marine Physical Laboratory, Technical Memorandum #649, 2020.
[15] John R. Potter, 'Underwater Sonar: Plenty of New Twists to an Old Tale,' Marine Technology Society Journal, VOL. 42, NO. 1, 2008, pp. 68–74.
[16] Jeffrey R. Bates, Paul C. Hines, Gaetano Canepa, Alessandra Tesei, Gabriele Ferri, & Kevin D. LePage, 'Doppler Estimates for Large Time-Bandwidth Products Using Linear FM Active Sonar Pulses,' in proceedings of 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 2017, pp. 169–176.
[17] Ultra Maritime, Free Flooded Ring: For Low Frequency Active Sonar [Brochure], 2021. https://www.ultra.group/ (accessed 2025.11.05.)
[18] R. E. Francois & G. R. Garrison, 'Sound Absorption Based on Ocean Measurements: Part I: Pure Water and Magnesium Sulfate Contributions,' The Journal of the Acoustical Society of America, VOL. 72, NO. 3, 1982, pp. 896–907.
[19] R. E. Francois & G. R. Garrison, 'Sound Absorption Based on Ocean Measurements. Part II: Boric Acid Contribution and Equation for Total Absorption,' The Journal of the Acoustical Society of America, VOL. 72, 1982, pp. 1879–1890.
[20] James H. Churnside, Ocean Remote Sensing with Differential Absorption Sonar, NOAA Environmental Research Laboratories, Wave Propagation Laboratory, NOAA Technical Memorandum ERL WPL-144, 1986.
[21] L. Houégnigan, P. Safari, C. Nadeu, M. van der Schaar, & M. André, 'A Novel Approach to Real-Time Range Estimation of Underwater Acoustic Sources Using Supervised Machine Learning,' in proceedings of OCEANS 2017 – Aberdeen, 2017, pp. 1–5.
[22] B. O'Neill, 'Signal Absorption-Based Range Estimator for Undersea Swarms,' M.S. thesis, Massachusetts Institute of Technology & Woods Hole Oceanographic Institution, 2020.
[23] Xavier Lurton, An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications (2nd ed.), Springer, 2010.
[24] N. C. Makris, 'The Statistics of Ocean-Acoustic Ambient Noise,' in T. Leighton (Ed.), Sea Surface Sound 1997, Kluwer Academic Publishers, 1997.
[25] John Lipor, John Gebbie, & Martin Siderius, 'Understanding and Mitigating the Impact of Passing Ships on Underwater Environmental Estimation from Ambient Sound,' The Journal of the Acoustical Society of America, VOL. 157, NO. 2, 2025, pp. 811–823.
[26] D. A. Hague & J. R. Buck, 'An Experimental Evaluation of the Generalized Sinusoidal Frequency Modulated Waveform for Active Sonar Systems,' The Journal of the Acoustical Society of America, VOL. 145, 2019, pp. 3741–3755.
[27] National Marine Fisheries Service, 'Biological Opinion on U.S. Navy SURTASS Low Frequency Active (LFA) Sonar Routine Training and Testing Activities (2019–2026) in the Western and Central North Pacific and Eastern Indian Oceans; And on NMFS' Promulgation of Regulations and Issuance of a Letter of Authorization,' Office of Protected Resources, NOAA, Biological Opinion, Consultation No. OPR-2019-00120, 2019.
[28] Minja Bae, Jihyun Park, & Jong Rak Yoon, 'Analysis of a Fixed Source-to-Receiver Underwater Acoustic Communication Channel Parameters in Shallow Water (in Korean),' The Journal of the Acoustical Society of Korea, VOL. 38, NO. 5, 2019, pp. 494–510.
[29] N. Morozs, W. Gorma, B. T. Henson, L. Shen, P. D. Mitchell, & Y. V. Zakharov, 'Channel Modeling for Underwater Acoustic Network Simulation,' IEEE Access, VOL. 8, 2020, pp. 136151–136175.
[30] Kevin L. Cockrell & Henrik Schmidt, 'A Relationship Between the Waveguide Invariant and Wavenumber Integration,' The Journal of the Acoustical Society of America, VOL. 128, NO. 1, 2010, pp. EL63–EL68.
[31] L3Harris Technologies, Inc., Helicopter Long-Range Active Sonar [Brochure], 2021. https://www.l3harris.com/ (accessed 2025.11.07.)
[32] National Marine Fisheries Service and U.S. Department

of the Navy, Joint Interim Report: Bahamas Marine Mammal Stranding Event of 15–16 March 2000, Interim Report, 2001.
[33] Youngcheol Jung & Keunhwa Lee, 'Observation of the Relationship Between Ocean Bathymetry and Acoustic Bearing–Time Record Patterns Acquired During a Reverberation Experiment in the Southwestern Continental Margin of the Ulleung Basin, Korea,' Journal of Marine Science and Engineering, VOL. 9, NO. 11, 2021, 1259.
[34] Peter H. Dahl & Jee Woong Choi, 'Precursor Arrivals in the Yellow Sea, Their Distinction from First-Order Head Waves, and Their Geoacoustic Inversion,' The Journal of the Acoustical Society of America, VOL. 120, NO. 6, 2006, pp. 3525–3533.
[35] Euro-Argo Data Selection, Float 3902616 – Cycle 20 (ARVOR Profiling Float). https://dataselection.euro-argo.eu/cycle/5935078 (accessed 2025.10.02.)
[36] Euro-Argo Data Selection, Float 6990599 – Cycle 59 (ARVOR Profiling Float). https://dataselection.euro-argo.eu/cycle/5828708 (accessed 2025.10.05.)
[37] Yong-Woo Lee, Mi-Ok Park, Seong-Gil Kim, Tae-Hoon Kim, Yong Hwa Oh, Sang Heon Lee, & Dongjoo Joung, 'Long-Term Variations in pH in Coastal Waters Along the Korean Peninsula,' Biogeosciences, VOL. 22, NO. 3, 2025, pp. 675–690.
[38] Euro-Argo Data Selection, Float 6990659 – Cycle 6 (ARVOR Profiling Float). https://dataselection.euro-argo.eu/cycle/5878948 (accessed 2025.10.10.)
[39] Euro-Argo Data Selection, Float 2901810 – Cycle 42 (ARVOR Profiling Float). https://dataselection.euro-argo.eu/cycle/5168397 (accessed 2025.10.10.)
[40] Bok Kyoung Choi, Bong-Chae Kim, Cheolsoo Kim, & Byoung-Nam Kim, 'Analysis of Dependence on Wind Speed and Ship Traffic of Underwater Ambient Noise at Shallow Sea Surrounding the Korean Peninsula (in Korean),' The Journal of the Acoustical Society of Korea, VOL. 22, NO. 3, 2003, pp. 233–241.
[41] Hae-Ho Lee, GyuTae Park, KeeCheol Shin, & Sung-Il Cho, 'A Study on Performance Improvement of Target Motion Analysis Using Target Elevation Tracking and Fusion in Conformal Array Sonar (in Korean),' Journal of KIMST, VOL. 22, NO. 3, 2019, pp. 320–331.
[42] Donghyeon Kim, Gihoon Byun, Daehwan Kim, & Jeasoo Kim, 'Relationship Between Array-Invariant-Based Range Estimation and Effective Range in Range-Dependent Environments (in Korean),' The Journal of the Acoustical Society of Korea, VOL. 43, NO. 4, 2024, pp. 455–465.