



Received: 2026/03/31
Revised: 2026/04/11
Accepted: 2026/05/22
Published: 2026/06/30

***Corresponding Author:**

Jong-Jin Park

80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Republic of Korea

E-mail: jjpark@knu.ac.kr

Abstract

본 연구는 HYCOM 자료 기반 동해 상층 해양 구조가 가변 심도 소나(VDS)의 탐지거리/최적수심에 미치는 영향을 분석하였다. 여름철에는 필라멘트 구조의 표층 전선/변형 및 얇은 혼합층이 VDS 탐지거리의 수심/방위 비단조성을 유도하였고, 겨울철에는 깊은 혼합층/상층구조 수직 연결성이 얇은 VDS 최적수심/깊은 수심 비균질 구조 순효과(RD-RI) 강화를 유도하였다. 특히, 여름철에는 전선·와류·수온약층 기울기 등 RD 구조가 탐지 성능을 지배한 반면, 겨울철에는 계절 평균 배경장과 비균질 구조 효과의 분리가 관측되었다. 이들 결과는 동해 상층의 다중스케일 해양 구조가 VDS 탐지성능을 방위와 운용 수심에 따라 증폭 또는 감쇠시킨다는 점을 보여준다.

This study examines the effect of upper-ocean structure on the detection performance of VDS. In summer, filamentary surface fronts/shallow mixed layers produce a nonmonotonic detection range on source depth and azimuth. In winter, a deeper mixed layer/vertically coherent upper-ocean structure yield a shallow optimal detection ranges, with intensified horizontal inhomogeneity (RD-RI) for VDS at greater depths. In summer, acoustic control is dominated by fronts, eddies, and thermocline slopes, whereas, in winter, the peaked RD-RI difference suggests a separation between mean background and spatially inhomogeneous structure. These results the selective impact of multiscale upper-ocean structure on VDS performance according to azimuth and depth.

Keywords

HYCOM 재분석 자료(HYCOM Reanalysis), 해양 상층 다층 구조(Upper-Ocean Multiscale Structure), 경로 의존 수중 음향 특성(Range-Dependent Acoustics), 가변 심도 소나(Variable-Depth Sonar), 혼합층 수심(Mixed-Layer Depth), 방향 의존성(Directional Dependence)

Acknowledgement

이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 미래국방혁신기술개발사업(RS-2024-00507484)의 지원을 받아 수행된 연구임.

이 논문은 2026년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원(RS-2023-00256005(2520000594))을 받아 수행된 연구임.

HYCOM 기반 동해 중규모-아중규모 구조가 가변 심도 소나 탐지 성능에 미치는 영향

Effects of HYCOM-Derived Mesoscale and Submesoscale Upper-Ocean Structure in the East Sea on Variable-Depth Sonar Detection Performance

임규창¹, 서인하², 박종진^{3*}

¹경북대학교 경북해양과학연구소 연구교수

²경북대학교 해양학과 박사과정

³경북대학교 지구시스템과학부/경북해양과학연구소 교수

Gyuchang Lim¹, Inha Seo², Jong-Jin Park^{3*}

¹Research professor, Kyungpook Institute of Oceanography, Kyungpook National University

²Doctoral student, Department of Oceanography, Kyungpook National University

³Professor, School of Earth System Sciences/Kyungpook Institute of Oceanography, Kyungpook National University

1. 서론

수중 음향 탐지 성능은 수온과 염분에 의해 결정되는 음속 분포, 혼합층 깊이, 수온약층 기울기, 그리고 와류 및 전선에 의해 형성되는 수평 비균질 구조에 매우 민감하다[1]. 동일한 소나 시스템이라도 해양 환경의 계절성 및 방향에 따라 전파손실과 탐지거리가 크게 달라질 수 있으며, 이러한 변화는 특히 상층 해양 구조가 복잡한 해역에서 두드러진다. 최근 해양역학 연구에서는 중규모 와류와 제트가 형성하는 변형장(strain field) 위에서 밀도 전선, 필라멘트, 작은 결맞음 소용돌이(coherent vortex)와 같은 아중규모 흐름이 발달하며, 이들이 에너지 전달과 혼합, 물질 수송 및 상층 해양의 비균질화를 강화하는 것으로 보고되어 왔다[2]. 이러한 아중규모 흐름은 일반적으로 강한 전선성과 $O(1)$ 로스비 수를 동반하는 상층 구조를 통해 파악된다[3]. 그러나 이러한 다중스케일 상층 구조가 수중 소나 탐지성능에 어떤 방식으로 영향을 미치는지에

대해서는, 계절별 평균 구조와 실제 비균질 구조를 구분하여 분석한 연구가 상대적으로 제한적이다.

특히 동해와 같이 중규모 와류, 전선, 강한 계절 수온약층, 깊은 겨울 혼합층이 공존하는 해역에서는 표층 전선성의 강도만으로 소나 성능을 충분히 설명하기 어렵고, 실제 음향 경로(acoustic path)를 따라 형성되는 3차원 음속구조와의 결합을 함께 고려해야 한다. 선행 연구에 따르면, 김혜림 등은 중규모 소용돌이를 모사하여 3차원 음속 구조하에서 소나 성능을 비교 분석하였지만, 실 해역에서 나타나는 수중 구조의 비등방성 특성을 포기해야 했고[4], 임규창 등은 고해상도 수중 글라이더 자료를 활용하여 전선 특성 및 아중규모 해양 구조를 포착하는데 일부 성공하였지만, 관측 한계로 인해 3차원 구조의 특성을 파악하는데 한계를 보였다[5]. 본 연구는 이들 선행 연구의 이점과 한계를 보완하기 위하여 HYCOM 재분석 자료를 활용하였다. 이를 통해 공간 고해상도가 보여주는 아중규모 구조 파악을 일부 포기하는 대신 3차원 비등방적 해양 구조를 포함함으로써, 실 해역에서의 소나 탐지 성능을 분석하였다.

본 연구의 목적은 HYCOM 기반 상층 해양구조와 Bellhop 다방위 2D fan 모의를 결합하여, 여름과 겨울의 상층 중규모-아중규모 구조가 VDS 소나의 탐지 거리와 최적 운용 수심을 어떻게 조절하는지를 정량적으로 평가하는 데 있다. 이를 위해 VDS의 심도를 상층 10 m부터 10 m 간격으로 최대 100 m 수심까지 변경함으로써 각각의 심도에서 Bellhop 기반 다방위 2D fan 기법을 사용하였다. 또한, 표층 density-front intensity(밀도장 전선 세기), 변형(strain/|f|), 혼합층 깊이(mixed-layer depth)를 계산하여 상층 구조의 계절적 차이를 진단하고, 각 방위에 대해 RD(range dependent)와 RI(range independent) 환경에서의 누적 탐지 거리 및 최대 탐지 거리를 비교하였다. 또한 path-based metric을 통해 표층 전선성, 혼합층 깊이, 수온약층 깊이, 그리고 VDS 위치에서의 음속 연직구배가 탐지성능과 어떤 관련을 갖는지를 분석하였다. 즉, (1) 계절별·방위별 최적 VDS 수심이 어디에 형성되는지, (2) 그 최적 수심이 표층 전선성 및 혼합층 구조와 어떻게 연결되는지, (3) RD 비균질 구조의 순효과가 어느 깊이에서 가장 강한지를 밝히고자 하였다.

본 연구는 HYCOM 재분석 자료의 해상도 한계로

인해 중규모와 아중규모를 완전히 분리하여 비교할 수 없기 때문에 중규모 배경 유동 위에 중첩된 아중규모 전선성 및 혼합층 구조가 음향 환경을 어떻게 조절하여 VDS 탐지 성능에 영향을 주는가를 밝히는 데 초점을 두었고, 상층 다중스케일 구조와 음향 반응의 결합 관점에서 분석을 수행하였다.

2. 방법론

2.1 HYCOM 재분석 자료

본 연구에서 사용된 HYCOM 자료는 미국 해군, 플로리다 주립대학교, 로스 알라모스 국립연구소 등 국제적 기관들이 개발한 HYCOM GOFS 3.1(Global Ocean Forecast System version 3.1) analysis 제품으로, 수평 해상도 약 $1/12^\circ(0.08^\circ)$, 약 9 km, 수직 41개 레이어, 시간 해상도 3시간 간격의 글로벌 자료이다[6]. 분석 도메인은 동해 연안 지역(약 $129^\circ\text{E} - 132^\circ\text{E}$, $35.5^\circ\text{N} - 38.5^\circ\text{N}$)으로 설정하였으며, 계절적 차이를 관찰하기 위해 2020년 자료 중 표층에서 아중규모 구조가 나타나는 시기를 선별하여 여름철 대표 자료(2020년 10월 13일 12:00)와 겨울철 대표 자료(2020년 1월 21일 09:00)를 각각 선정하였다. 또한, Bellhop 모델에 입력하기 위해 HYCOM 자료를 1 km(수평)×1 m(수직) 격자 간격으로 linear interpolation을 적용하여 재격자화하였다. 사용한 변수는 3차원 온도, 염분, 유속(u, v)와 2차원 SSH이며, 중규모 및 아중규모 해양 구조가 상층에 한정되어 나타나기 때문에 수직 방향으로 표층부터 1000 m까지의 자료만을 사용하였다. 표층 및 상층 해양 구조를 진단하는 데 필요한 자료는 동일 시각의 온도, 염분, 유속장으로부터 계산하였고, 음속은 수온-염분-압력의 함수로 산출하였다. HYCOM 자료는 중규모 배경 유동과 이에 중첩되어 나타나는 일부 아중규모 전선성 신호를 동시에 표현할 수 있어, RD 음속장 구성에 적합하다. 다만 주어진 수평 해상도(대략 ~ 9 km)는 전통적인 아중규모 전 범위를 완전히 분리·해상하기에는 제한이 있으므로, 본 연구에서 사용하는 “아중규모”는 submesoscale-like 전선 지표 또는 아중규모 지표라는 의미로 사용한다.

Fig. 1은 연구 해역에서의 표층 해류와 SSH를 나타낸다. 두 계절(여름, 겨울)에 대해 중규모 및 아중규모

모 소용돌이 구조가 나타나며, 표층 고도는 여름철에 강하게 나타난다. 그림에서 별 표시 지점은 VDS의 위치를 나타내고, 하얀색 실선은 100 km 크기를 가지며 4 방위를 가리킨다; 방위각 0°는 동(az000), 90°는 북(az090), 180°는 서(az180), 270°는 남(az270)을 나타낸다. 본 연구에서는 표층 해양 환경의 비등방성이 소나의 탐지 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 소나로부터 동일한 거리만큼 떨어진 곳에 타겟을 두고 Bellhop 다방위 2D fan 모사를 수행하였다.

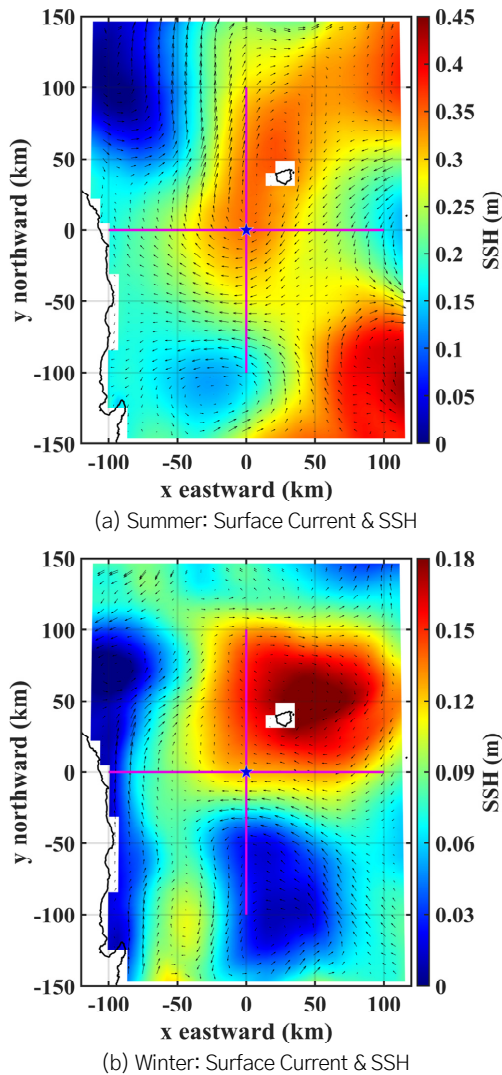


Fig. 1. SSH (sea surface height) map with surface currents for summer and winter

2.2 표층 및 상층 구조 진단 지표

본 연구에서는 HYCOM 재분석 유속 자료를 활용하여 표층의 운동학적 구조를 진단한다. 이를 위해 상

대와도(ζ), 변형(strain), Okubo-Weiss(OW) 매개변수를 계산하였다. 상대와도의 정의는 식 (1)과 같다.

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

변형(strain)은 크게 normal strain(s_n)과 shear strain(s_h)으로 나뉘며, 각각의 정의는 식 (2)와 같다. 본 연구에서는 이들의 벡터합으로 정의되는 총 strain magnitude(s)를 사용한다.

$$\begin{cases} s_n = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \\ s_h = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \\ s = \sqrt{s_n^2 + s_h^2} \end{cases} \quad (2)$$

국소 유동이 회전 우세인지(vorticity-dominant) 아니면 변형 우세인지(strain-dominant)를 판별하는 대표적인 진단 지표로 활용되는 OW 매개변수는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$OW = s^2 - \zeta^2 \quad (3)$$

국소 유동이 회전 우세인 영역에서는 $OW < 0$ 이 값을 갖고, 변형 우세 영역에서는 $OW > 0$ 의 값을 가진다. 본 연구에서는 코리올리 스케일($f = 2\Omega \sin(\phi)$)과 비교한 무차원 ζ/f (국소 로스비 수 Ro 와 동일)와 $s/|f|$ 를 사용하여 각각 회전·변형 강도를 나타냈다[7].

표층의 전선성은 부력의 수평 기울기(buoyancy gradient) 혹은 이에 상응하는 밀도장의 수평 기울기(density gradient)로 진단할 수 있으며, 각각은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} b &= -\frac{g}{\rho_0}(\rho - \rho_0) \\ \text{Front Intensity} &= \log_{10}|\nabla_h b| \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 b 는 부력을 나타내고, FI (front intensity)의 동등한 보조 지표로서 밀도장의 수평 기울기 $\log_{10}|\nabla_h \rho|$ 를 사용하기도 한다. 본 연구에서는 이들을 병행하여 사용한다. 대개 FI 가 클수록 수평 밀도 전선이 날카롭고, frontogenesis 및 열풍 전단(thermal-wind shear)의 잠재력이 크다고 볼 수 있다.

일반적으로 변형이 유도하는 frontogenesis는 밀도 전선을 빠른 속도로 날카롭게 하며, 이는 중규모 변형장과 아중규모 전선 강화를 연결하는 주요 기작으로 알려져 있다[3].

혼합층 깊이(MLD; mixed layer depth)를 추정하기 위한 방식에는 혼합층 연구에서 널리 사용되는 밀도 기준(density criterion) 방식과 수온 기준(temperature criterion) 방식이 있다. 이들 표준 방식에 따르면[8], 밀도 기준에서는 기준 깊이 10 m에서의 밀도와 비교하여 $\Delta \rho = 0.03 \text{ kg m}^{-3}$ 이상 차이가 나타나는 첫 깊이를 MLD로 정의하고, 수온 기준에서는 $\Delta T = 0.2^\circ\text{C}$ 기준을 사용하여 MLD를 정의한다. 본 연구에서는 밀도 기준 방식을 적용하여 MLD를 계산하였다.

2.3 음향 모델 및 탐지 성능 지표

본 연구에서는 음향 해석을 위해 Bellhop 기반 2D fan 기법을 적용하였다. 이 방법은 중심 source에서 여러 방위각으로 2차원 음향 단면을 추출하여 RD 전파를 수행한 뒤, 방위별 결과를 통계적으로 결합하는 방식이며, 본 연구의 목적인 3차원 비균질 해양구조를 실용적으로 분석하는데 적합하다[9]. Table 1은 본 연구에서 적용한 Bellhop 환경 및 계산 설정을 보여준다. 또한, 시뮬레이션은 ‘incoherent mode’로 수행하였는데, 이는 본 연구의 목적이 계절과 방위를 포함한 누적 탐지 거리와 최대 탐지 거리의 변화를 분석하는 것이었기에, 광역 성능 지표를 산출하는데 안정

Table 1. Bellhop environment & simulation setting

Parameter	Values
Frequency	3,000 Hz
Beam Type	Gaussian Beam
Run Type	Incoherent ('I') / Ray ('R')
Number of Beams	401
Step Size	25.0
Sea Surface	Vacuum ('V'), Flat
Bottom Type	Acoustic-elastic half-space ('A')
Bottom Sound Speed	1,600 m/s
Bottom Density	1.8 g/cm ³
Bottom Attenuation	0.8 dB/λ
Horizontal Resolution	1.0 km
Vertical Resolution	1.0 m

적인 평균 에너지 합산 방식의 ‘incoherent mode’를 선택했다. 실제 운용에 있어서도 ‘coherent mode’는 위상 유지의 어려움 때문에 위상 간섭에 따른 전달 손실(TL)이 과하게 나타난다.

본 연구에서는 동(0°), 북(90°), 서(180°), 남(270°) 방향을 중심으로 해석하였으며(Fig. 1 참조), 각 방위에 대해 HYCOM 기반 RD 음속장과 동일 단면의 range-mean으로 만든 RI 음속장을 각각 사용하였다. 이러한 fan 접근은 비등방적 전선 및 와류 구조에 대한 방향 의존적 음향 응답을 정리하는 데 유리하다[3].

본 연구에서는 각 방위별 소나 탐지거리 계산을 위해 소나 시스템의 변수를 소나 방정식에 대입하여 신호초과(SE; signal excess)를 산출하였고, 이를 통해 누적 탐지거리와 최대 탐지거리를 계산하였다. 소나 방정식은 식 (5)와 같다[10].

$$SE = SL - 2TL + DI - (RL + NL) + TS - DT \quad (5)$$

식 (5)에서 SE는 능동 신호초과(dB), SL은 음원 준위(source level; dB), TL은 전달 손실(transmission loss; dB), DI는 지향지수(directionality index; dB), NL은 주변 소음준위(noise level; dB), TS는 표적강도(target strength; dB), DT는 탐지 문턱값(detection threshold; dB)을 나타낸다. 상기 소나 방정식에서 RL은 잔향(reverberation level; dB)을 나타내는데, 본 연구에서는 고려하지 않는다. Table 2는 VDS의 운용을 위한 변수 설정을 나타낸다. 결과 해석에서 탐지 가능 구간은 $SE > 0$ 으로 결정된다.

상층 해양 구조가 소나 탐지 성능에 미치는 영향성 평가를 위해 본 연구에서는 VDS의 최대 누적 탐지거

Table 2. SONAR parameter setting of VDS

Parameter	Value
Source Level	215 dB
Source Depth	10 ~ 100 m
Receiver Depth	10 ~ 100 m
Target Depth	100 m
Directivity Index	20 dB
Detection Threshold	27 dB
Vertical Beamwidth	-45° ~ +45°
Target Strength	10 dB
Noise Level	60 dB

리와 최적 운용 수심을 추출하고, 이를 위해 VDS의 송·수신 수심을 일치되도록 10~100 m 범위에서 10 m 간격으로 변화시킨다. 각 조건에서 능동 소나 방정식 (식 (5)) 기반의 SE cut을 통해 탐지 가능 구간을 판별 하였으며, 이를 바탕으로 누적 탐지 거리(R_{cum})와 최대 탐지 거리(R_{max})를 계산하였다. 여기서 R_{cum} 은 $SE > 0$ 인 유효 탐지 구간을 1 km 간격 range grid에서의 누적 길이로 정의하였고, R_{max} 는 $SE > 0$ 이 나타난 최외각 거리로 정의하였다. 또한, RD와 RI 사이의 차이 $\Delta R = R_{RD} - R_{RI}$ 를 계산하여 실제 비균질 해양 구조의 순효과를 정량화하였다[5]. 최적 운용 수심은 VDS 운용 수심 범위(10~100 m)에 대하여 아래와 같이 각각 정의하였다.

$$z_{opt}^{RD} = \arg \max (R_{cum, RD})$$

$$z_{opt}^{\Delta} = \arg \max (R_{cum, RD} - R_{cum, RI}) \quad (6)$$

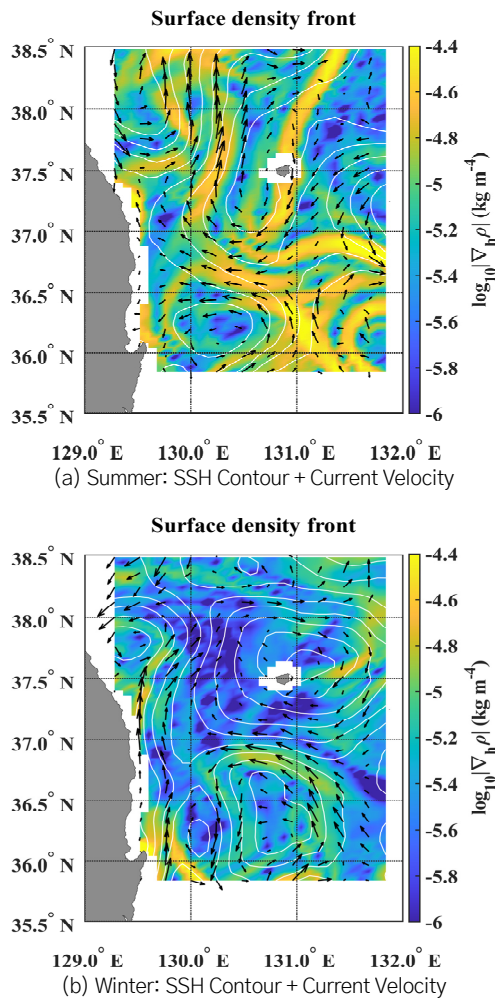


Fig. 2. Front intensity map for summer and winter, with SSH contour and current velocity

이러한 탐지 성능 지표는 실제 운용적 의미를 갖는 성능 차이를 정리하는데 유리하다. 추가로 표층 전선 성과 상층 수직구조가 실제 음향 응답과 어떻게 연결 되는지 해석하기 위하여, 방위별로 acoustic path를 따라 경로 기반 진단 지표(metric)를 추출하였다. 사용한 진단 지표에는 front intensity, strain/ $|f|$, MLD, thermocline depth 등이 포함되었다.

3. 분석 결과

3.1 계절별 표층 및 상층 구조의 차이

Fig. 2~4는 계절별 표층과 상층 구조의 특성을 보여준다. 이를 통해 여름과 겨울의 구조적 특성이 뚜렷한 차이를 보인다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2에서 나타난 전선 구조를 보면, 여름에는 표층 전선 강도

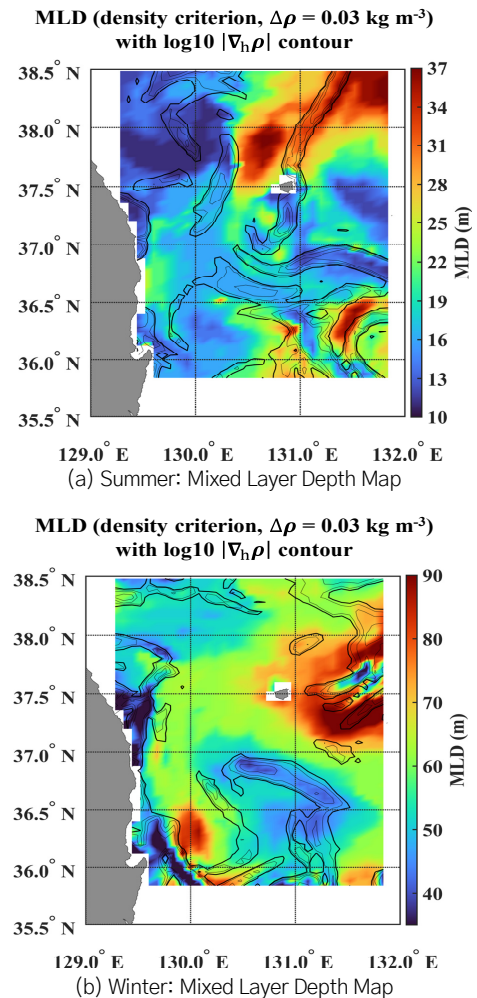


Fig. 3. MLD map for summer and winter, with FI (front intensity) contour

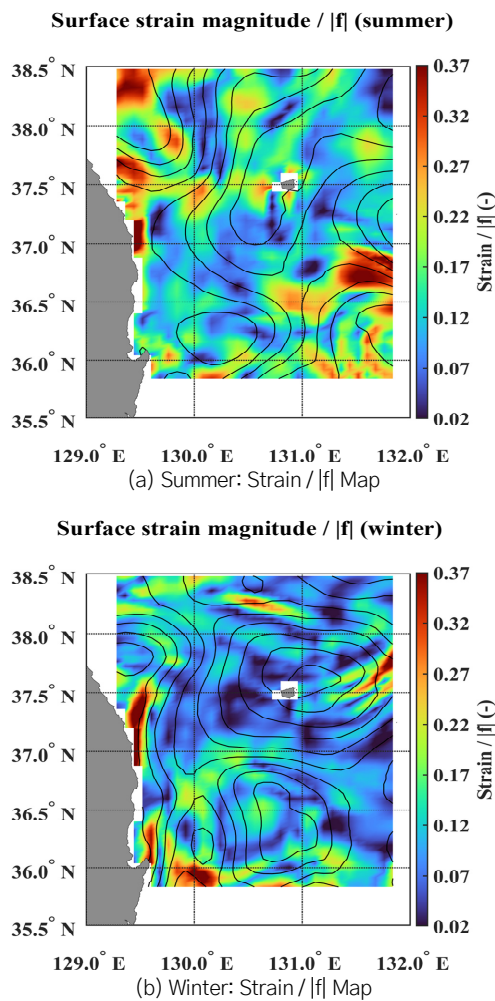


Fig. 4. Strain magnitude map for summer and winter

(FI)가 겨울에 비해 상대적으로 filamentary하고 방향성이 큰 띠 구조를 보이며, VDS source 주변을 지나는 전선이 남북 및 동서에 대해 비대칭적으로 배치되어 있다. 반면 겨울에는 VDS source의 동쪽과 북동쪽에서 강한 전선이 나타난다.

Fig. 3에서 나타난 MLD와 전선 구조를 보면, 여름에는 대체로 약 12~36 m 범위에서 공간 변동을 보이는 얇은 MLD가 나타나고, VDS source 주변도 대체로 20 m대의 혼합층을 가진다. 반면 겨울에는 MLD가 약 35~90 m로 뚜렷하게 깊어지고, 특히 VDS source의 동쪽과 북동쪽에서 관측되는 깊은 혼합층은 강한 전선과 동시성을 가진다.

Fig. 4의 변형 구조에 있어서도 두 계절 모두 공간적으로 patchy하지만, 여름에는 더 국지적이고 filamentary한 높은 strain 영역이 두드러진 반면, 겨울에는 보다 넓은 배경장 위에 조직적인(organized) 구조

가 나타난다. 이들을 종합해 보면, 여름에는 “얇고 날카로운 상층 전선성”이 발달한 반면, 겨울에는 “깊고 수직적으로 연결된 상층 구조”가 우세하다는 것으로 볼 수 있다. 이러한 차이는 VDS 탐지 거리의 계절별·방위별 수심 의존성에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.2 VDS 수심 변화에 따른 RD 누적 탐지 거리

Fig. 5는 여름과 겨울철 해양 환경에서의 방위별 RD 누적 탐지 거리 결과를 보여준다. 즉, 여름철 최대 누적 탐지거리를 만드는 VDS 수심은 방위별로 az000(동향)=90 m, az090(북향)=30 m, az180(서향)=20 m, az270(남향)=20 m로 주어지면, 겨울철에는 전 방위에서 10 m로 주어진다. 이를 통해 여름과 겨울의 탐지 성능 조절 방식이 본질적으로 다를 수 있다. 여름철에는 누적 탐지거리가 VDS 수심에 대해 강한 비단조성을 보이며, 방위별로 서로 다른 peak를 가진다. 즉, 동향은 깊은 수심에서 최대 누적 탐지거리가 나타나고, 나머지 일부는 얇거나 중간 수심에서 최대 누적 탐지거리를 가진다. 이에 따르면, 여름철에는 “깊을수록 유리하다” 또는 “얕을수록 유리하다”와 같은 단순한 규칙이 성립하지 않고, 방위마다 서로 다른 최적 수심대가 존재한다. 이는 얇은 계절 수온약층과 비대칭적인 전선 구조가 음향 경로와 선택적으로 결합하기 때문으로 해석된다.

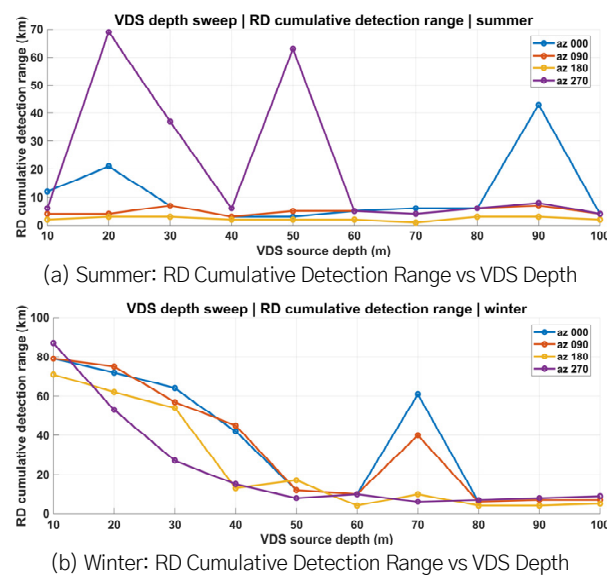


Fig. 5. RD cumulative detection range w.r.t VDS depth for summer and winter

겨울철에는 전반적으로 10~30 m의 얇은 VDS 수심에서 누적 탐지거리가 크게 나타난다. 그러나 40~60 m 수심구간으로 내려가면서 성능이 감소하고, 동향과 북향에서는 70 m 전후에서 다시 2차적인 증가가 관찰된다. 이는 겨울 상층의 유리한 배경 음속 구조가 기본적으로 얇은 VDS를 유리하게 만들되, deeper coupling depth가 특정 방위에서 추가적인 성능 향상을 유도할 수 있음을 의미한다. 따라서, 겨울의 RD 탐지 성능은 “전반적 shallow optimum + 조건부 deeper secondary optimum”의 형태로 요약할 수 있다.

3.3 RD-RI 차이와 최적 운용 수심

Fig. 6과 7은 실제 비균질 해양 구조의 순효과를 가장 직접적으로 보여준다. 여름철에는 $\Delta R = R_{RD} - R_{RI}$ 가 방위와 수심에 따라 부호와 크기가 크게 바뀌며, 총 탐지 성능이 최대가 되는 수심과 비균질 구조 효과가 최대가 되는 수심이 대체로 유사하게 나타난다. 즉, 여름철의 z_{opt}^{Δ} 는 az000(동향)=90 m, az090(북향)=30 m, az180(서향)=20 m, az270(남향)=20 m로 주어지며, 겨울철의 z_{opt}^{Δ} 는 az000(동향)=70 m, az090(북향)=70 m, az180(서향)=50 m, az270(남향)=90 m로 주어진다. 이는 여름철 탐지 성능의 수심 의존성이 계절 평균 배경장보다 실제 RD 구조, 즉 frontal tilt, eddy edge, thermocline slope, local

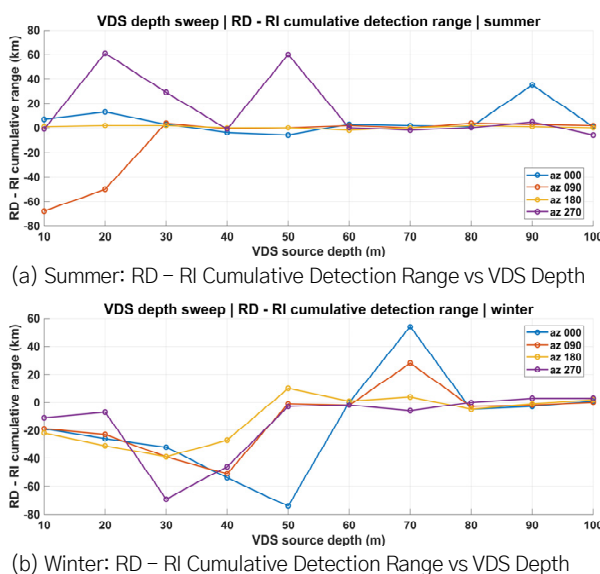


Fig. 6. RD-RI cumulative detection range w.r.t VDS depth for summer and winter

SSP curvature 등에 의해 직접 조절된다는 것을 시사한다. 말하자면 여름철 해양 환경은 “heterogeneity-controlled optimum”의 성격을 가진다고 볼 수 있다.

겨울철에는 총 RD 누적 탐지 거리의 최대값이 얇은 수심에서 형성되는 반면, ΔR 는 더 깊은 수심에서 양(+)의 값을 나타낸다. 특히 얇은 10~50 m 구간에서는 ΔR 가 음(-)이 되는 경우가 많아, 실제 비균질 구조가 오히려 RI 평균장보다 탐지 성능을 약화시키는 역할을 한다. 그러나 약 70 m 전후의 deeper layer에서는 ΔR 가 양(+)으로 전환되어, 실제 비균질 구조가 선택적으로 탐지 성능을 강화하는 깊이가 존재함을 보여준다. 이는 겨울철 해양 환경이 “background - controlled shallow optimum + heterogeneity-controlled deeper response”의 구조를 가진다는 뜻이다. 이 결과를 종합하면, 여름에는 실제 비균질 구조가 총 탐지 성능을 직접 지배하고, 겨울에는 계절 배경장이 먼저 shallow optimum을 만들고 그 위에 deeper RD 효과가 중첩된다고 볼 수 있다.

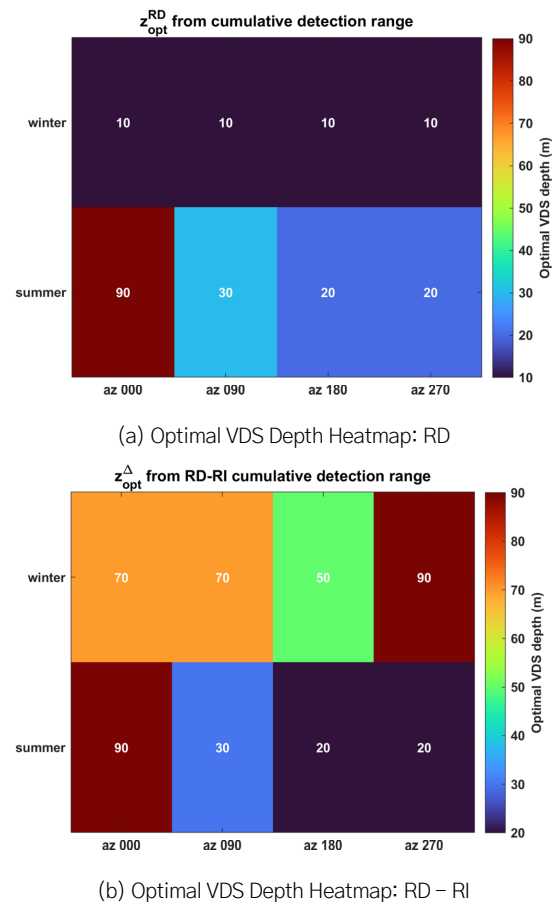


Fig. 7. RD-RI cumulative detection range w.r.t VDS depth for summer and winter

3.4 Path-Based Metric과 물리적 해석

Fig. 8과 9는 계절별·방위별 경로를 따라 계산된 진단 지표들을 보여주며, 탐지 성능 차이에 대한 물리적 설명을 제공한다. 여름철에는 평균 MLD가 대체로 약 15~35 m, thermocline depth가 약 22~43 m 범위에 놓여 있어 상층 구조가 매우 얇다. 그림 7에서 확인한 것처럼, 북·서·남(az090, az180, az270)의 z_{opt} 가 20~30 m에 놓이는 것은 이 얇은 MLD-thermocline 전이대와 잘 부합한다. 즉, 여름철의 shallow-to-mid optimum은 표층 front와 얇은 thermocline의 결합에서 비롯된다고 볼 수 있다. 반면 az000(동향)의 deep optimum(90 m)은 표층 front intensity나 얇은 MLD만으로 설명되지 않으며, 이는 동향 경로에서 더 깊은 SSP curvature나 thermocline slope, 혹은 deeper refractive structure가 작용했음을 시사한다. 즉, 여름철의 최적 수심은 단순히 surface front intensity 크기만으로 결정되지 않고, 경로를 따라 본 3차원 상층 구조(front-MLD-thermocline-source depth)가 필수적임을 보여준다.

겨울철에는 양상이 더 분명하다. MLD는 약 40~90 m, thermocline은 약 75~190 m로 깊어져 여름보다 훨씬 두꺼운 상층 구조를 이룬다. 흥미롭게도 겨울철의 z_{opt}^{Δ} 가 50~90 m 범위에 놓이는 것은 이 깊어진 혼합층 및 상부 thermocline과 잘 대응한다. 이는 실제 비균질 구조의 음향 효과가 겨울철에는 더 깊은 층에서 나타난다는 Fig. 6과 7의 결과와 정합적이다. 특히 동향(az000)과 북향(az090)의 경우, 70 m 수심에서 ΔR 가 크게 양(+)으로 바뀌는 것은 깊은 혼합층 구조 안쪽 또는 그 기저 경계에서 RD focusing이 강화되었을 가능성을 보여준다. 즉, deeper RD-RI maximum은 단순한 seasonal stratification 효과가 아니라 깊어진 혼합층과 수온약층이 형성한 구조적 coupling depth의 반영으로 해석하는 것이 타당하다. 반대로 얇은 10~30 m 구간에서 $\Delta R < 0$ 인 것은 계절 평균으로는 유리한 shallow 배경장이 실제 비균질 구조 때문에 부분적으로 깨졌음을 뜻한다.

이들 결과는 또 하나의 중요한 시사점을 제공한다. 강한 front intensity 혹은 strain/|f|가 항상 긴 탐지 거리를 보장하지는 않는다. 실제로 어떤 방위에서는 표층 전선성이나 strain이 상대적으로 강하더라도 누적 탐지 거리가 작게 나타날 수 있다. 이는 표층 전

선이 강하더라도 그것이 음향 경로에 대해 어떤 방향성을 가지는지, 그리고 그 전선이 혼합층-수온약층 구조와 어떻게 결합하는지가 더 중요하기 때문이다. 따라서 본 연구가 보여주는 핵심은 “강한 전선=긴 탐지 거리” 등식이 아니라, 전선과 상층 수직구조가 특정 방위와 특정 VDS 수심에서만 효과적으로 결합할 때 긴 탐지거리가 형성된다는 점이다.

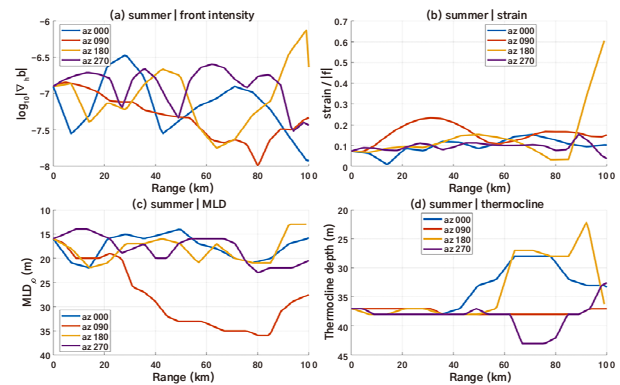


Fig. 8. Path-based metric profiles along four azimuths for summer

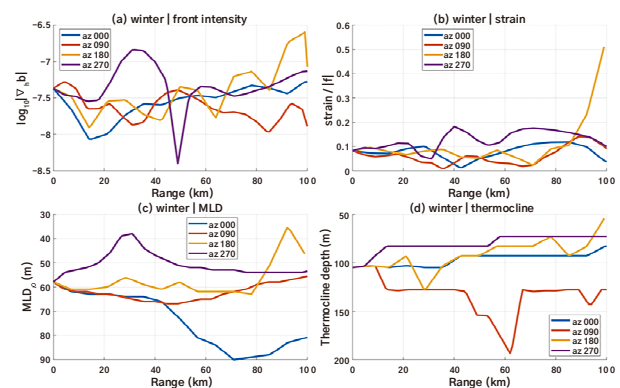


Fig. 9. Path-based metric profiles along four azimuths for winter

4. 토의

본 연구의 결과는 중규모와 아중규모 난류 특성이 VDS 탐지 성능에 미치는 영향성을 엄밀하게 분리했다고 볼 수 없으며, 보다 정확히는 중규모 배경유동이 제공하는 방향성과 상층구조 위에 아중규모 전선성 및 혼합층 구조가 중첩되어 탐지 성능을 조절한다는 점을 강하게 부각한다. 이는 다음의 한계에 기인하는 측면이 크다.

첫째, HYCOM 재분석 자료의 수평 해상도는 아중

규모 전선성 신호를 진단하는 데 유용하지만, 전통적인 아중규모 전 범위를 완전하게 분해한다고 보기는 어렵다. 임규창 등의 연구에서 제시한 수중글라이더는 고해상도 단면에는 강점이 있었으나, 본 연구의 다방위 3차원 구조 해석에는 한계가 있다[5]. 결국 고해상도 3차원 자료에 기반하여 아중규모 난류 특성이 소나의 탐지 성능에 미치는 영향성을 온전히 평가하기 위해서는 ROMS(regional oceanic modelling system)와 같은 모델을 통해 고해상도 아중규모 자료를 생산하여 활용해야 한다.

둘째, Bellhop 다방위 2D fan 기법은 실무적으로 매우 유용하지만, 완전한 3차원 coupling, internal wave, sea-state scattering, bottom uncertainty를 모두 반영하지 못한다. 이는 본 연구에서 상층부의 해양 구조만을 고려한 이유이기도 하다.

셋째, 현재 결과는 계절별 사례 비교와 VDS depth sweep에 강점이 있지만, mesoscale-only와 mesoscale+submesoscale anomaly field를 엄밀히 분리하는 filtering experiment는 아직 수행하지 않았다. 이를 위하여 향후 추가 연구를 진행할 예정이다.

본 연구의 나타난 한계를 극복하기 위해서는 향후 연구에서 세 가지 보완이 특히 중요하다. 첫째, SSH, density, velocity의 spatial filtering을 통해 mesoscale background와 submesoscale anomaly를 분리한 뒤, 각각에 대한 Bellhop 실험을 수행하면, 두 스케일의 상대적 기여를 더 명확하게 정량화할 수 있다. 둘째, VDS source 주변 밀도장 전선 방향을 계산하여 동-서-남-북 고정 방위 대신 front-normal과 front-parallel 방향으로 음향 단면을 재구성하면 보다 물리적인 해석이 가능해진다. 셋째, HFR(high frequency radar) 자료 기반 사건 catalog와 HYCOM composite 분석을 결합하면, 현재의 계절별 사례 비교를 넘어서 “어떤 전선성/혼합층 구조가 어떤 acoustic response를 유도하는가”를 통계적으로 제시할 수 있다. 이러한 확장은 본 연구의 사례 기반 seasonal study에서 일반화된 multiscale acoustic-ocean coupling 연구로 발전시키는 데 기여할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 HYCOM 기반 상층 해양구조와 Bellhop 다방위 2D fan 모사의 결과를 결합하여, 동

해 상층 중규모-아중규모 구조가 VDS 소나 탐지거리와 최적 운용수심을 어떻게 조절하는지 계절별로 비교하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 여름과 겨울은 상층 preconditioning 상태가 뚜렷하게 다르다. 여름철은 얇은 혼합층과 강한 방향 비대칭성을 갖는 filamentary 전선 구조가 우세하며, 겨울철은 깊은 혼합층과 보다 수직적으로 연결된 상층 구조가 우세하다. 둘째, 이러한 계절적 차이는 VDS 탐지 성능의 수심 의존성에 직접 반영되어, 여름철에는 방위별로 서로 다른 최적 수심대가 형성되는 반면, 겨울철에는 전반적인 얇은 최적 VDS 수심대와 제한적인 deeper secondary 최적 수심대가 함께 나타난다. 셋째, RD-RI 비교 결과는 여름철에는 실제 비균질 구조가 총 탐지 성능을 직접 지배하고, 겨울철에는 계절 평균 배경장이 얇은 최적 수심대를 만든 뒤 실제 비균질 구조가 deeper layer에서 추가적인 증폭 또는 감쇠 효과를 부여함을 보여준다.

결과적으로 여름철에는 “heterogeneity-controlled optimum” 특성이 지배적이고, 겨울철에는 “background-controlled shallow optimum + deeper heterogeneity response”라를 이중 구조의 특성이 지배적으로 나타난다고 볼 수 있다.

참고문헌

- [1] Kevin D. Heaney & Richard L. Campbell, ‘Three-Dimensional Parabolic Equation Modeling of Mesoscale Eddy Deflection,’ The Journal of the Acoustical Society of America, VOL. 139, NO. 2, 2016, pp. 918–926.
- [2] L. N. Thomas, A. Tandon, & A. Mahadevan, ‘Submesoscale Process and Dynamics,’ In M. W. Hecht & H. Hasumi (Eds.), Ocean Modeling in an Eddying Regime, 2008.
- [3] James C. McWilliams, ‘Submesoscale Currents in the Ocean,’ Proceedings of the Royal Society A, VOL. 472, NO. 2189, 2016, Article 20160117.
- [4] Hye-Rim Kim & Jee-Woong 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,’ Journal of KNST, VOL. 3, NO. 1, 2020, pp. 20–45.
- [5] Gyuchang Lim & JongJin Park, ‘Glider-Resolved Sonar Performance in Mesoscale Eddy Fields of the East Sea: Seasonal Comparison of HMS and VDS at 3 kHz,’ Journal of KNST, VOL. 8, NO. 4, 2025, pp. 872–881.
- [6] Eric P. Chassignet, Harley E. Hurlburt, Ole Martin Smedstad, George R. Halliwell, Patrick J. Hogan, Alan J.

Wallcraft, Remy Baraille, & Rainer Bleck, 'The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) Data Assimilative System,' *Journal of Marine Systems*, VOL. 65, NO. 1-4, 2007, pp. 60-83.

[7] Andrew F. Thompson & William R. Young, 'Scaling Baroclinic Eddy Fluxes: Vortices and Energy Balance,' *Journal of Physical Oceanography*, VOL. 36, NO. 4, 2006, pp. 720-738.

[8] Clément de Boyer Montégut, Gurvan Madec, Albert S. Fischer, Alban Lazar, & Daniele Iudicone, 'Mixed Layer Depth

over the Global Ocean: An Examination of Profile Data and a Profile-Based Climatology,' *Journal of Geophysical Research Oceans*, VOL. 109, NO. C12.

[9] Finn Bruun Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, & H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, Springer Science & Business Media, 2011.

[10] Robert J. Urick, *Principles of Underwater Sound* (3rd ed.), McGraw-Hill, 1983.