# Journal of the



ISSN: 2635-4926

Check for updates

2020; Vol.3, No.1; pp. 020-045

https://doi.org/10.31818/JKNST.2020.03.3.1.20

 Received:
 2019/11/15

 Revised:
 2019/12/23

 Accepted:
 2020/01/19

 Published:
 2020/03/22

\*Corresponding Author:

Hye-Rim Kim

E-mail: proudkhr@naver.com

#### Abstract

본 논문에서는 향후 해군에서 도입될 예정인 수상함 운용 복합소나시스템의 중규모 소용돌이 환경으로 인한 소나탐지성능 변화에 대해 다루었다. 소나탐지거리에 영향을 미치는 요소는 크게 소나시스템의 종류와 해양환경 특성 2가지로 분류할 수 있으며, 각 요소에 대한 소나탐지거리를 분석하였다. 여기서 소용돌이가 존재하는 환경에서 최대탐지거리와 누적탐지거리 오차 범위의 평균값, 표준편차, 최소값, 최대값을 제시하였다. 이를 바탕으로 해군에서 대잠수함 작전시 소나 탐지 성능에 대한 오차범위를 감안하여 소나를 운용한다면 표적에 대한 탐지가능성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

This thesis goes in depth about the changes in the capabilities of sonar detection due to mesoscale eddy environment in an Integrated Sonar System Operated by Surface Vessel which is expected to be implemented in the Navy in the near future. Factors that affect the distance of sonar detection can be categorized by 1) type of sonar system and 2) characteristics of marine environment. Here, the average, standard deviation, minimum, and maximum values of the maximum detectable and cumulative detectable range of margin of errors are presented in the presence of the eddy. Based on this, if the sonar is operated in consideration of the margin of error on sonar detection performance during the operation of the anti-submarine warfare, it is expected to improve the detectability of the target.

#### Keywords

Integrated Sonar System Operated by Surface Vessel(수상함 운용 복합소나시스템), Mesoscale Eddy(중규모 소용돌이), Detection Performances(탐지 성능)

#### Acknowledgement

이 논문은 2019년도 국방과학연구소에서 지원하여 수행된 연구임.

본 논문은 해군과학기술학회 2019년 추계학술대회 발표논문을 기반으로 작성되었습니다.

# 동해 남서부 해역의 중규모 소용돌이에 따른 수상함 운용 복합소나시스템의 탐지성능 변화에 대한 연구

# A Study on the Detection Performances of the Integrated Sonar System Operated by Surface Vessel in the Mesoscale Eddy in the Southwestern East Sea

# 김혜림<sup>1\*</sup>, 최지웅<sup>2</sup>

<sup>1</sup>해군 작전사 제6항공전단 정보참모 소령 <sup>2</sup>한양대학교 해양융합과학과 교수

#### Hye-Rim Kim<sup>1\*</sup>, Jee-Woong Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Commander, ROK Fleet, Air Wing 6, Intelligence Director Lieutenant Commander <sup>2</sup>Professor, Department of Marine Science and Convergence Engineering

# 1. 서론

대잠수함 작전의 핵심 요소는 소나(SONAR: Sound Navigation and Ranging) 탐지거리를 정확히 예측하는 것이다. 해군 전력이 바다로 임무 를 나가기 전 해양환경에 적합한 모델링 및 시뮬레이션을 통한 결과 분석 내용이 제공된다면 사전 정보 없이 임무를 수행하는 것보다 해상 작전 수 행능력이 향상될 수 있다. 변동성이 존재하지 않는 해양에서는 탐지 성능 을 비교적 정확히 예측하는 것이 가능하나, 변동성이 심한 해양에서의 소 나 탐지성능 예측은 매우 어렵다. 본 논문에서는 향후 해군에서 도입할 예 정인 수상함 운용 복합소나시스템(Integrated Sonar System Operated by Surface vessel)에서 중규모 소용돌이 환경으로 인한 소나탐지성능 변 화에 대해 다루었다. 수상함 운용 복합소나시스템은 단일의 수상함에서 선체 고정형 소나(HMS: Hull Mounted Sonar), 가변 심도 소나(VDS: Variable Depth Sonar), 예인형 선배열 소나(TASS: Towed Array Sonar) 의 조합으로 운용된다.

수상함은 과거부터 현재까지 주로 선체 고정형 소나 또는 예인형 선배 열 소나를 단독으로 운용해 왔다. HMS는 선체에 부착되어 해수면에 가 깝게 존재하기 때문에 표층 도파관이 생성되는 경우 표층 탐지는 유리하 지만, 심층에서는 탐지가 제한된다. 그리고 혼합층(MLD: Mixed Layer Depth)이 생성되지 않는 여름철의 경우, 표 층수온 상승으로 인한 음파의 하향굴절로 인해 탐지가 어 려워진다. 수상함 운용 복합소나시스템은 운용수심을 변 경할 수 있기 때문에 다양한 심도의 표적탐지에 유리하다. 혼합층이 생성되는 겨울철의 경우에도 운용수심이 넓기 때 문에 중층과 심층에 대한 탐지가능성이 크다. 소나탐지거 리에 영향을 미치는 요소는 크게 소나 시스템의 종류와 해 양환경특성 2가지로 분류할 수 있다. 먼저 소나시스템 종류 로는 수상함 운용 복합소나시스템의 다양한 운용조합 중 운용수심이 고정된 HMS 송신-HMS 수신 조합과 운용수심 변경이 가능한 VDS 송신-TASS 수신 조합을 고려하였다 (Fig. 1). 해양환경 특성으로는 중규모 소용돌이 종류, 중심 위치, 크기에 따른 탐지성능 변동성을 확인하였다.



Fig. 1. 수상함 운용 복합소나시스템 개념도

# 2. 능동소나 탐지 성능지표 구현

2.1. 거리종속음파전달모델

본 논문에서는 거리 종속 음파전달 모텔을 사용하였으 며, 이 모델은 일반 해양뿐 아니라 중규모 소용돌이가 존재 하는 특수한 해양환경에서의 음파전달 현상도 설명이 가능 하다. 중규모 소용돌이에 의해 발생한 음속변화에 따른 탐 지거리 차이 변화를 보기 위하여 음속은 거리에 따른 종속 환경으로 두고, 해저저질이나 수심은 독립환경으로 가정 하였다. 이를 위해 munk profile을 적용하여 임의 생성된 중규모 소용돌이에서의 탐지성능 변화를 확인하였다. 또 한소용돌이가 포함된 HYCOM 수치분석 모델 자료의 데이 터베이스를 활용한 연중 중규모 소용돌이에서의 탐지성능 변동성도 확인하였다. 2.2 소나방정식을통해 능동 신호초과 산출

운용해역의 해양환경 정보와 설정된 소나시스템의 변수를 식(1) 소나방정식에 대입하여 신호초과(SE: signal excess)를 산출할 수 있다. 수상함 운용 복합소나시스템은 능동소나의 신호초과(ASE: active signal excess)를 산출할 수 있다[1].

$$ASE = SL - 2TL + DI - (RL + NL) + TS - DT (1)$$

여기서 ASE는 능동 신호초과(dB), SL은 음원준위(source level, dB), TL은 전달손실(transmission loss, dB), DI는 지향지수(directivity index, dB), NL은 주변 소음준위 (noise level, dB), TS는 표적강도(target strength, dB), DT 는 탐지문턱(detection threshold, dB)을 나타낸다. 능동 신호초과는 수신되는 신호에서 표적반향음과 잔향음 또는 주변소음과의 비를 나타낸다. 이것은 수신신호와 잔향음 및 주변소음의 크기를 시간에 따라 비교하여 거리에 따른 함 수로 나타낼 수 있다. 잔향음이란 해수 중으로 송출된 음파 가 다양한 전파경로를 거치며 매질 및 경계면으로부터 산 란되어진 후 수신기에 되돌아오는 음파의 시간에 따른 총 합으로[2], Fig. 2는 해양에서의 잔향음(해수면, 해저면, 체 적잔향음) 모식도이다.



Fig. 2. 해양에서의 잔향음 모식도

본 논문에서 중주파수 대역(3 kHz)의 경계면 산란특성 을 고려했으며 잔향음을 계산하기 위해 고려되어야 할 6가 지 요소는 다음과 같다. 음원준위, 음원에서 경계면으로의 전달손실, 경계면에서 수신기까지의 전달손실, 산란강도, 음원과 수신기의 빔패턴, 산란 면적이며 이를 통해 식 (2)와 같이 잔향음을 계산할 수 있다.

$$RL(t) = 10 \log \iint_{A(t)} \sum_{s=1}^{M} \sum_{r=1}^{N} I_0 \varphi_{sa} \varphi_{ra} SS(\theta_s, \theta_r, \Phi_{sr})$$
(2)  
$$B(\theta_s, \Phi_s) B(\theta_r, \Phi_r) dA$$

식 (2)에서 M은 음원-산란체간 고유음선 개수, N은 산 란체-수신기간 고유음선 개수, I<sub>0</sub>는 음원강도이다[3].  $\varphi_{sa}$ 은 음원-산란체간 전달손실,  $\varphi_{ra}$ 은 산란체-수신기간 전달 손실이며 SS( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\Phi_{sr}$ )은 산란강도이다. 또한 B( $\theta_s$ ,  $\Phi_s$ ) 은 음원 빔패턴, B( $\theta_r$ ,  $\Phi_r$ )은 수신 빔패턴, dA는 산란면적 값을 나타낸다. 동해 해역은 중규모 소용돌이가 자주 발생 하는 특성을 가지고 있기 때문에 이를 반영한 음파전달 양 상 모의가 필요하다. 본 논문에서 사용한 능동소나의 운용 주파수 대역이 3 kHz인 점을 감안했을 때, 여기서 사용할수 있는 음파전달모델은 거리종속 환경에서 적용가능하고 중·고주파수에서 효율적인 음선 이론 기반의 Porter(1987) 가 고안한 가우시안 빔(Gaussian beam) 알고리즘을 적용 하였다[4]. 이를 통해 잔향음 및 능동 신호초과를 계산하였 으며 Fig. 3은 능동 신호초과 도출 흐름도이다.



Fig. 3. 능동신호초과 도출 흐름도

본 논문에서 이 모델을 사용한 이유는 다른 음파전달 모델 보다 중주파수 대역에서 음장의 계산시간이 짧으며 음원에 서 표적 그리고 표적에서 수신기로의 고유음선 정보를 도출 할 수 있기 때문이다.

#### 2.3. 소나탐지거리 계산방법

위에서 계산한 신호초과 값(dB)을 바탕으로 능동소나의 표적 탐지거리를 결정할 수 있으며, 표적 수심에서 중규모 소용돌이에 따른 탐지거리 변화를 확인할 수 있다. 능동소 나의 경우 신호초과를 표적수심에 따른 탐지거리로 나타낼 수 있다. 신호초과가 0의 값을 가지면 탐지확률(detection probability)이 50%가 된다는 의미이며, 수신되는 신호와 소음의 준위가 같다는 것을 뜻한다. 여기서 신호초과가 양 의 값을 가지면 탐지확률이 50% 이상으로 탐지가 가능하 다는 것을 뜻하고, 음의 값을 가지면 탐지확률이 50% 이하 로 탐지가 제한된다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 Fig. 4 와 같이 2가지 계산방법을 적용하여 탐지거리를 산출하였 다. Fig. 4(b)는 maximum detectable range(최대탐지거 리)로 Fig. 4(a)에서 파란색 실선이다. 이것은 설정한 거리 (1 km) 이상 탐지가 지속되는 최대거리를 말하며 탐지가 되 지 않는 null 발생구간도 포함한다. Fig. 4(c) cumulative detectable range(누적탐지거리)로 빨간색 실선을 나타내 며, 최대탐지거리 중에서 null 발생구간을 제외하고 설정한 거리(1 km) 이상 탐지된 거리의 총합이다. Fig. 4(b), 4(c)의 우측 그림은 수심 60 때에서 최대탐지거리는 25 km이고 누 적탐지거리는 7 km이다. 이를 통해 알 수 있는 사실은 탐지 거리 계산방법에 따라 소나탐지거리가 달라지게 된다.



(c) 누적탐지거리(cumulative detectable range)

#### Fig. 4. 소나탐지거리 계산방법

#### 2.4. 탐지가능성

본 논문에서는 탐지가능성이라는 새로운 개념을 도입하 였다. 이를통해 수중표적에 대한 탐지가능 정도를 정확히 파 악할 수 있다. 탐지가능성이란, 최대탐지거리에서 누적탐지 거리를 백분율 한 값이다. 이는 식 (3)을 통해 구할 수 있다.

# 3. 임의생성된 중규모 소용돌이의 탐지성능변화

# 3.1 환경변수 선정

1번째 연구에서는 Munk(1974)가 표준화시킨 대양에서 의음속구조를 이용하였다[6]. 표준해양(canonical ocean) 은 해양의 성층화로 인해 수심에 따른 밀도 변화를 가정하 고, 대양의 수중음속을 표준화시킨 것이다.

#### 3.1.1 수심 선정

본 논문에서는 동해 해역의 특성에 맞는 환경변수값을 Munk 음속구조 내 입력값으로 설정하였다. Table 1은 국 립해양조사원에서 관할해역을 분석한 결과(2012)이며 이 에근거하여 평균수심을 1,500 m로 설정하였다.

#### Table 1. 국립해양조사원 관할해역 분석결과 [7]

구분	면적	평균수심	최대수심
전체	443.838 km <sup>2</sup>	783 m	2,985 m
동해	120.447 km <sup>2</sup>	1,500 m	2,985 m
서해	191.449 km <sup>2</sup>	55 m	124 m
서해	191.449 km <sup>2</sup>	55 m	124 m
남해	131.942 km <sup>2</sup>	71 m	198 m

# 3.1.2 최소음속층 및 기준음속 선정

다음으로 동해 남서부 해역의 최소음속층(MSL: minimum sound speed layer)을 설정하기 위해 임등(2006)의 참고문헌을 활용하였다. Fig. 5를 통해 6년간(1999-2004) CREAMS와 ARGO Float 자료를 통해 산출된 음속구조를 바탕으로 최소음속층 깊이의 공간 분포를 나타내었다. 이 를통해울진 동방 146 km 해역(동경 131°, 북위 37°) 최소음 속층을 400 m로 확인할 수 있다. 본 논문에서는 한국해양 연구소에서 동해 남서부 해역의 최소음속층에 관한 연구 결과(1995)에 따라 기준 음속은 1,455 m/s로 정하였다.



Fig. 5. 동해 남서부 해역의 최소음속층 깊이의 공간 분포[8]

3.1.3 Munk profile로 모의된 음속 구조

우리나라 동해 해역의 특성에 맞게 설정한 입력값을 적 용하여 음속구조를 모의하였으며, Fig. 6은 모의된 음속구 조 결과이다.





#### 3.1.4 표적수심 선정

본 논문에서는 표적수심을 정하기 위해 음향층심도(SLD: sonic layer depth)와 혼합층(MLD: mixed layer depth)을 활용하였다. 음향층심도는 해양에서 수중표적을 수색하거 나탐지하는 해군 작전에 많은 영향을 미친다. 일반적으로 2 가지 정의는 다르게 내려져 왔으나, 혼합층 깊이가 음향학 적으로는 음향층심도와 같다고 할 수 있다. 음향층심도는 음파통로에서 최대 음속을 갖는 깊이로 정의되고, 대부분의 경우에 혼합층 깊이와 동일하다. 일반적으로 잠수함은 대 잠 세력으로부터 접촉과 탐지를 회피하고자 음영구역 내에 서 기동을 한다. 여기서 我 수상함으로부터 회피하는 敵 잠수 함을 가정하면, 피탐이 되지 않기 위해 잠항할 수 있는 심도 를 최적 심도(BD: best depth)라고 한다. 최적심도는 현재 해군에서 사용 중인 산출방법을 사용하였으며 식 (4)와 (5) 를 통해 구할 수 있다[8]. 여기서 음향층심도 깊이가 60m 미만이거나 이상일 때 적용하는 식이 달라진다.

Best depth = 
$$SLD + 60 \text{ m} (SLD \ge 60 \text{ m})$$
 (4)

Best depth = 
$$17\sqrt{SLD}$$
 (SLD < 60 m) (5)

본 논문에서는 동해 남서부 해역의 음향층심도를 정하기 위해서 임 등(2015)이 분석한 동해의 연평균 혼합층 깊이분 포를 활용하였다. 여기서 공간 분포를 통해 소나 운용지점의 연평균 혼합층 깊이를 35 m로 확인하였다. 이 값을 식 (5)에 대입하여 산출된 최적심도 100 m를 표적수심으로 정하였다. 3.2 중규모 소용돌이 모의

# 3.2.1 중규모 소용돌이 개념 및 중요성

Mcwiliams(2008)에 따르면, 소용돌이는 동해뿐 아니 라, 전 세계 대양에서 쉽게 찾아볼 수 있는 구조이다[9]. 이 것은 수중에서 물 입자들의 크고 작은 회전 운동으로 주변 해수와 다른 특성을 가지며, 일정 방향으로 순환하는 지속 되고 고립된 수괴를 말한다. 이와 마찬가지로 우리나라 동 해에서도 넓은 범위에 걸쳐 거의 모든 계절에 소용돌이가 발생하고 있다. 소용돌이의 규모는 소규모에서부터 대규모 까지 매우 다양하게 나타난다. 본 논문에서는 그 중에서도 동해 해역에서 연중 발생빈도가 높은 중규모 소용돌이를 대 상으로 탐지성능 변동성을 확인하였으며 수십에서 백 여 km 공간 규모와 수 주(weeks)에서 수 개월(months) 시간 규모를 가진 소용돌이라고 정의하였다.

소용돌이의 형성은 동해 해수 순환 특성 연구에 복잡성을 주고, 해양 기후에 영향을 미치는 등 동해의 물리적 특성 연구 에 많은 어려움을 주고 있다. 소용돌이는 주변 해수와 비교하 여 수온 및 염분이 다르므로 어류, 플랑크톤 등 해양생물 분포 에도 큰 영향을 미친다[10]. 또한 수중음속 분포가 주위 해수 와 달라 음파의 전달경로에 영향을 주기 때문에 음향을 이용 한 해양탐사 외에도 군사적인 측면까지 그 중요성이 인식되 고 있다[11].

#### 3.2.2 중규모 소용돌이 종류

일반적으로 동해 남서부 해역에서는 대마 난류와 그 분 지류 등 해류의 영향으로 시·공간적으로 다양한 중규모 소 용돌이가 자주 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히 여름철 에는 동해의 북쪽과 북서쪽 연안 경계를 따라 리만 한류와 북한 한류가 남쪽으로 흐르며, 이러한 해류들이 사행(meandering)하는 중간에 여러 개의 소용돌이가 발달하게 된다. 동한 난류의 유입에 의해 형성되는 소용돌이는 크게 울릉 난수성소용돌이(UWE: Ulleung warm eddy)와독도 냉수 성소용돌이(DCE: Dok cold eddy) 두가지로 구분할 수 있 다. Fig. 7은 울릉분지 일대의 난수성 소용돌이와 냉수성 소 용돌이 모식도이다. 울릉 난수성 소용돌이는 울릉도 주변 에서 시계방향의 순환 형태로 나타나며, 소용돌이 내부에 난수를 포함하고 있어 해수면이 주변과 비교하여 수온이 높 게 나타난다. 독도 냉수성 소용돌이는 독도 남쪽에서 반시 계방향으로 순환하며, 소용돌이 내부에 냉수를 포함하고 있어 해수면 주변과 비교하여 수온이 낮게 나타나는 것이 특징이다[12].



Fig. 7. 울릉 난수성 소용돌이와 독도 냉수성 소용돌이의 생성 모 식도[13]

#### 3.3 중규모소용돌이의특성

# 3.3.1 일반적 특성

소용돌이로 인한 영향에 대해 2가지 관점으로 해석할수 있다. 먼저 수중음향학적 관점에서 보게 되면, 소용돌이의 발달은 수온 변화를 일으키고 이로 인해 음속 구조 변화가 발생하여 수중음파 전달특성이 달라지기 때문에 결국에는 소나탐지성능에까지 영향을 주는 중요한 해양환경적 요인 으로 볼 수 있다[10].

다음은 해양 물리학적 관점이다. 소용돌이는 운동량, 열, 영양분, 염분 등 여러 가지 물질을 이동시킴으로서 대양에 서의 순환과 해양 생태계 유지에 중요한 역할을 한다. 또한 에너지나 물질을 전선(front)으로 분리된 서로 다른 지역 사이를 가로질러 전달하는 역할을 한다. 이처럼 소용돌이 는 대양의 다양한 물리적 현상을 지배하기도 한다[10].

## 3.3.2 시간적 특성

중규모 소용돌이에 따른 탐지성능 변화를 보기 위해서 는 시·공간적 변동성에 대한 이해가 선행되어야 한다. 이 등 (2013)에 따르면, 총 19년(1993~2011년) 간의 해수면 고도 자료(SSH) 상에 소용돌이 탐색 알고리즘을 적용하여, 동해 해역에 출현하는 소용돌이 분포의 시·공간적 변동성을 분 석하였다. Fig. 8은 월별, 계절별 소용돌이 특성에 대한 그 래프이다.

Fig. 8(a)와 8(c)에서 나타나는 검정색 실선은 한 해 안에 서 매년 일정한 변동성을 시계열 자료로 보여주는 것으로, 대체로 한 해의 전반부에 소용돌이의 개수가 많고 후반부에 는 소용돌이의 개수가 줄어드는 경향을 보여준다. 막대그 래프에 표시되어 있는 분홍색 선과 파란색 선은 각각 최소



Fig. 8. 동해 해역에서 출현하는 월별, 계절별 소용돌이의 특성[14]

값, 평균값, 최대값을 의미한다. 매년 3월을 기준으로 순서 대로 3개월씩봄에서 겨울로 간주하고, 같은 계절에 속한모 든 기간의 자료를 평균으로 나타내었다. 여기서 막대그래 프는 소용돌이의 계절별 특성, 꺾은선 그래프는 난수성 소 용돌이와 냉수성 소용돌이의 월별 특성을 의미한다.

먼저소용돌이의계절별특성에대해서살펴보자. Fig. 8(a) 계절별소용돌이의 개수를 보면 종류에 상관없이 소용돌이 는 봄철(3~5월)에가장 많이 발생하고, 여름(6~8월)과가을 철(9~11월)에는 줄어드는 경향이 있다. 이에 반해 Fig. 8(b) 계절별 소용돌이의 반경은 가을철(9~11월)에 최대치를 보 이고, 봄철(3~5월)에 최소치를 보였다. Fig. 8(c) 계절별 소 용돌이의 강도는 봄철(3~5월)에 가장 약하게 나타나고 가 을철(9~11월)에 강하게 나타났다. 이를 정리해보면 봄철에 는 소용돌이의 개수가 최대치를 보이나 반경과 강도는 최소 치를 보였다. 반면 가을철에는 소용돌이의 개수가 최소치 를 보였으나 반경과 강도는 최대치를 보였다.

다음은 난수성 소용돌이와 냉수성 소용돌이의 월별 특성 이다. Fig. 8(d) 월별 소용돌이의 개수는 1~12월에 난수성 소용돌이의 개수보다 냉수성 소용돌이의 개수가 더 많았다. 냉수성 소용돌이는 12월에, 난수성 소용돌이는 7~8월에 가 장 적게 나타났으며, 종류와 관계없이 5월 중에 소용돌이가 많이 출현하였다.

Fig. 8(e) 월별소용돌이의 반경을 보면, 난수성 소용돌이 의 반경 최대값은 1월, 최소값은 6월에 나타났으며 냉수성 소용돌이의 반경 최대값은 9월, 최소값은 5월에 가장 작게 나타났다. Fig. 8(f) 월별소용돌이의 강도를 보면 난수성소 용돌이는 1월에, 냉수성 소용돌이는 11월에 가장 세게 나타 났다. 그리고 난수성 소용돌이는 6월에, 냉수성 소용돌이는 3월에 가장 약하게 나타났다.

위의 통계자료를 보면, 소용돌이의 개수는 봄철에 가장 많이 발생한다. 특히 난수성 소용돌이 경우 여름철(6~8월) 과 가을철(9~11월)에 최소값을 보이다가 겨울철(12~2월) 에 개수가 다시 증가하는 경향성을 나타낸다. 계절별 소용 돌이 개수가 증가하면 소용돌이 반경과 강도와 감소하는 패 턴을 보였다. 대체적으로 소용돌이의 개수가 늘어나면 소 용돌이 반경과 강도는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 8(e), 8(f)에서 소용돌이의 반경과 강도는 월별로 변 화 양상이 유사하게 나타났으며, 계절별로 보면 난수성 소 용돌이와 냉수성 소용돌이의 반경과 강도는 3~5월에 최소 값을 보였다. Fig. 8(b)를 보면 난수성 소용돌이와 냉수성 소용돌이가 9~12월 사이에는 반경 부분에서 반대의 패턴을 보였다. 다시 말해 난수성 소용돌이 반경이 커지면 냉수성 소용돌이가 작아지며, 11월에 뚜렷한 특징을 보였다. 여기 서 소용돌이의 개수가 늘어난다는 것은 그만큼 반경이 작고 강도가 약한 소용돌이가 많이 나타난다는 것이다. 반면에 소용돌이의 개수가 줄어들면, 줄어든 소용돌이가 가진 에 너지가 남아있는 나머지 소용돌이에게 전달되므로 그만큼 반경이 크고 세기도 강한 소용돌이가 생성된다는 것이다.

## 3.3.3 공간적 특성

본 논문에서는 동해 남서부 해역(128°E-134°E, 35°N-39°N) 내에서 일어나는 중규모 소용돌이에 대해 살펴보았 다. 일반적으로 동해 남서부 해역에서는 시계 방향으로 순환 하는 난수성 소용돌이, 북부 해역에서는 반시계 방향으로 순환하는 냉수성 소용돌이가 주로 나타난다. 해양환경 기반 통합소나체계 최적 운용조건 연구(2019)에 따르면, 소나시 스템운용조건을변화시킬수있는수심1,000 m - 2,000 m 해역에서 Fig. 9와 같이 5개 정점(P1~P5)을 선정하여 (a) 봄 철, (b) 여름철, (c) 가을철, (d) 겨울철에 따른 울릉 난수성 소용돌이의 분포 확률을 분석하였다. 봄철에는 모든 정점 에서 소용돌이 분포 확률이 15 % 이상으로 높았지만, 여름 철에는 반대로 모든 정점에서 15 % 미만으로 나타났다. 가 을철에는 울릉 분지 남부에서 분포 확률이 높게 나타났으며, 겨울철에는울릉분지중앙부의소용돌이분포확률이두드 러졌다. 공간적으로 연중 내내 울릉 분지 북서쪽 정점에서 난수성소용돌이분포확률이 높게(약15%이상) 나타났다.





#### 3.3.4 중규모 소용돌이의 모의과정

#### (1) 통계적 특성

해양환경 기반 통합소나체계 최적 운용조건 연구(2019) 에 따르면, 최근 10년간(1992.10 ~ 2006.10) HYCOM모델 자료에서 탐색된 소용돌이를 바탕으로 통계적 평균 특성을 계산하였다. 본 논문에서는 울릉분지 내 반경 20 km 이상 인 난수성과 냉수성 소용돌이를 대상으로 하였으며 여기서 최소 반경값, 평균 반경값, 최대 반경값을 얻을 수 있었다.

Table 2. 난수성과 냉수성 소용돌이의 통계적 특성[15]

구분		난수성 소용돌이	냉수성 소용돌이
	최소값	20 km	20 km
반경 (km)	평균값	33 km	33 km
()	최대값	48 km	48 km
	최소값	3.3 cm	3.1 cm
신폭 (cm)	평균값	0.6 cm	0.6 cm
(0.1.)	최대값	7.1 cm	6.5 cm
	봄	140 m	100 m
하부경계수심	여름	140 m	20 m
(m)	가을	140 m	50 m
	겨울	140 m	100 m
	최소값	30일	28일
수명 (일)	평균값	7일	7일
	최대값	249일	133일

## (2) 중규모 소용돌이 모의 원리

현재까지 소용돌이 생성 방법과 형태 등에 관한 연구는 지속적으로 진행되고 있으며 동해 소용돌이의 형성 기작에 대하여 해상풍, 해저지형, 동해 북부 한류의 침강요인 등 다 양한 이론들이 나오고 있다. 그러나 아직까지 정확한 원인 이 규명되지 않고 있으며, 최근에 인공위성 사진과 현장에 서 직접 관측, ARGO를 이용한 결과를 비교하는 등 소용돌 이에 대한 관측과 규명이 활발히 연구되고 있다. 본 논문에 서는 임의로 생성된 중규모 소용돌이에서의 탐지성능 변화 를 확인하기 위해 Munk profile 음속 구조에 가우시안 형 태를 가정하여 중규모 소용돌이 음속을 추가하였다. 이를 통해 거리에 따른 중규모 소용돌이의 음속 구조를 Fig. 10 과 같이 생성하였다.



Fig. 10. 중규모 소용돌이 모의 원리[4,6]

Fig. 11은 소용돌이의 일반적 특성을 반영하여 모의한 난 수성 소용돌이와 냉수성 소용돌이의 모식도이다. 직경은 소 용돌이의 수평 크기를 말하며, 진폭은 소용돌이 중심과 해 수면 높이의 차이이다. 하부경계수심은 수직적인 수온 변화 율이최대인지점으로 선정하며 Fig. 11은 11(a), 11(b)에서가 운데점선과노란색으로 음영처리된 부분에 해당한다. 난수 성 소용돌이의 경우 계절에 관계없이 140 m로 일정하나, 냉수성소용돌이는 봄철과 겨울철에 100 m, 여름철은 20 m, 가을철은 50 m로 계절마다 하부경계수심이 다르게 나타났 다. 본 논문에서는 Fig. 11(c), 11(d)에서 평균 수온 8°C를 기 준으로 난수성 소용돌이의 하부경계수심은 140 m, 냉수성 소용돌이의 하부경계수심은 100 m로 정하였다.



Fig. 11. 난수성/냉수성 소용돌이의 모식도 및 계절별 중심 평균 수온 프로파일[15]

위의 소용돌이의 특성을 고려하여 모의 변수를 설정하였 다. 실제 해양환경과 유사한 소용돌이 모의를 통한 결과값 을 산출하기 위하여 Table 3과 같이 환경 변수와 소용돌이 모의 변수를 설정하였다.

환경 변수에서 최대 수평거리는 90 km, 수평거리 간격 은 200 m, 동해 평균수심은 1,500 m로 정하였다. 최소음 속층과 기준음속은 각각 400 m와 1,455 m/s로 정하였다. 다음은 소용돌이를 모의할 때 변수로 반경에 대한 최소값 은 20 km, 평균값은 33 km, 최대값은 48 km로 정하였다. 3개 수치를 기준으로 소용돌이 반경을 모의하기 위하여 가 우시안 분포를 이용하였다. 가우시안 분포(Gaussian distribution)는 평균을 중심으로 좌우 대칭인 종(bell) 모양 을 갖는 확률 분포를 말한다. 가우시안 분포의 확률 밀도함 수는 식 (6)과 같이 나타내며 여기서 *x*는 계산위치, *m*은 평 균, σ2은 분산을 의미한다[16].

#### Table 3. 환경 변수와 소용돌이 모의 변수

	구분	수치	
	최대 수평거리	90 km	
	수평거리 간격	200 m	
환경 변수	동해 평균수심	1,500 m	
	최소음속층	400 m	
	기준음속	1,455 m/s	
소용돌이 모의 변수	최소, 평균, 최대 반경값	20, 33, 48 km	
	가로 표준편차	16000, 24200, 36200 (1 km = 721)	
	세로 표준편차	400	
	소용돌이 중심위치	0 km – 90 km	
	하부경계수심	· 난수성: 140 m · 냉수성: 100 m	

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$$
(6)

위의 식을 통해 최소반경값 20 km에 해당하는 표준편 차는 16000, 평균반경값 33 km에 해당하는 표준편차는 24200, 최대반경값 48 km에 해당하는 표준편차 36000 을산출하였다. 여기서 표준편차 721은 반경 1 km로 계산된 다. 본 논문에서는 중규모 소용돌이의 종류, 반경과 중심위 치에 따른 탐지거리 변화를 산출하였다. 먼저 소용돌이 종 류에 따른 탐지거리 변화를 보기 위해 난수성 소용돌이와 냉수성 소용돌이가 존재하는 경우를 가정하였다. 소용돌이 반경에 따른 탐지거리 변화는 Fig. 12와 같이 HYCOM 통계 특성 자료를 기준으로 최소값~최대값의 범위 내에서 결과 값을 도출하였다.



Fig. 12. 중규모 소용돌이의 최소 반경값, 평균 반경값, 최대 반경 값을 나타낸 모식도

#### 3.3.5 중규모소용돌이모의결과

위에서 제시한 환경 변수와 소용돌이 변수를 대입하여 Fig. 13과 같이 중규모 소용돌이의 종류와 반경에 따라 모의 하였다.



3.4 소나시스템 종류에 따른 탐지성능 변화

## 3.4.1 소나시스템 변수 설정

본 논문에서는 수상함 운용 복합소나시스템의 다양한 운용조합 중 운용수심이 고정된 HMS송신-HMS수신 조 합과 운용수심 변경이 가능한 VDS송신-TASS수신 조합 을 고려하였다. 각각의 소나시스템에 설정한 소나 변수는 Table 4와 같으며 3 kHZ라는 중주파수 환경에서 운용하였 다. HMS송신-HMS수신 조합에서 송신 준위(source level) 는 235 dB, 음원수심(source depth)과 수신기 수심(receiver depth)은 8 m, 수직 빔폭(vertical beamwidth)은 ±15° 로 설정하였다. VDS송신-TASS수신 조합의 송신 준위는 215 dB, 음원과 수신기 수심은 100 m, 수직 빔폭은 ±45°로 설정하였다. 표적수심(TD)은 100 m로 HMS송신-HMS수 신과 VDS송신-TASS수신 조합에 동일하게 적용하였다.

Table 4. HMS송신-HMS수신과 VDS송신-TASS수신 조합의 소 나시스템 변수

구분	HMS 조합	Value	VDS 조합	Value
	Frequency	3 kHz	Frequency	3 kHz
	Pulse length	2 sec	Pulse length	2 sec
능동	Source level	235 dB	Source level	215 dB
오니 변수	Source depth	8 m	Source depth	100 m
	Receiver depth	8 m	Receiver depth	100 m
	Target depth	100 m	Target depth	100 m
	Sea state	2	Sea state	2
	Directivity index	20 dB	Directivity index	20 dB
기타 소나 변수 <sup>-</sup>	Detection threshold	-27 dB	Detection threshold	–27 dB
	Vertical beam pattern model	SINX/X	Vertical beam pattern model	SINX/X
	Vertical beamwidth	±15°	Vertical beamwidth	±45°

# 3.4.2 소나시스템 종류에 따른 탐지성능 비교

Munk profile 음속 구조에서 소용돌이가 존재하지 않은 환경에서 HMS송신-HMS수신 조합과 VDS송신-TASS수 신조합의 탐지성능을 비교하였다. 여기서 표적수심은 100 m로 동일하게 설정하였고 HMS송신-HMS수신 조합은 음 원과 수신기 수심은 8 m로 하고, VDS송신-TASS수신 조합 은 음원과 수신기 수심은 100 m로 설정하였다. Fig. 14(a) HMS송신-HMS수신 조합의 경우는 음선이 강한 하향굴절 로 인해 해수면과 해저면의 반사가 일어나면서 사라지는 현 상을 보인다. Fig. 14(b) VDS송신-TASS수신 조합에서는 하 향굴절이 약하게 발생함으로 인해서 남아있는 음선들이 수 렴대를 타고 가면서 전파되는 현상이 나타난다.

다음은 신호초과를 통해 음파전달 양상을 비교하였다. Fig. 15(a) HMS송신-HMS수신조합은표적이잡히지않는 Null 발생구간(23 km - 43 km, 47 km - 67 km)이자주식 별된다. Fig. 15(b) VDS송신-TASS수신조합의 신호초과를 보면 HMS송신-HMS수신조합의 경우보다 음장구역이 더 촘촘하고 null 발생구간이 적게 나타난다.

이어서 표적수심 100 m에서 신호초과를 통해 최대탐지 거리와 누적탐지거리를 비교하였다. Fig. 16에서 빨간색실 선은 최대탐지거리이고, 노란색 실선은 누적탐지거리를 의 미한다. Fig. 16(a) HMS송신-HMS수신 조합의 경우 최대 탐지거리는 약 70 km, 누적탐지거리는 약 8 km로, null 발 생거리는 약 60 km가 산출되었다. VDS송신-TASS수신 조 합의 최대탐지거리는 약 90 km, 누적탐지거리는 약 20 km 후반으로, null 발생거리는 약 60 km가 산출되었다. 이를 통해 VDS송신-TASS수신 조합은 HMS송신-HMS수신 조 합에 비해 최대탐지거리와 누적탐지거리가 약 20 km 정도











(a) 표적수심 100 m에서 HMS송신-HMS수신 조합의 신호초과 Fig. 16. 소나시스템 조합에 따른 최대/누적탐지거리 길게 산출되는 경향을 보였다. 소용돌이가 존재하지 않는 환경에서 VDS송신-TASS수신 조합이 HMS송신-HMS수신 조합의 경우보다 최대탐지거리와 누적탐지거리가 길게 나 타난 것을 확인하였다.

다음은 HMS송신-HMS수신조합과 VDS송신-TASS수신 조합의 탐지성능 변화에 대해 비교하였다. 식 (3)을 통해 탐 지가능성을 구하면 HMS송신-HMS수신 조합은 약 11 %, VDS송신-TASS수신 조합에서는 약 29 %가 나온다. 즉, VDS송신-TASS수신조합이 HMS송신-HMS수신조합보다 탐지가능성 수치가 약 2배 정도 높게 나왔다. 이를 통해 도 출할 수 있는 사실은 VDS송신-TASS수신 조합이 HMS송 신-HMS수신 조합보다 최대탐지거리와 누적탐지거리가 길게 나타났으며, 탐지가능성도 높게 모의되었다.

소나시스템의 탐지가능성 측면에서 보면, 잠재적 대잠 위협이 큰 동해 해역에서는 중층이나 심층을 탐지하는데 누적탐지거리와 탐지가능성 수치가 높은 VDS송신-TASS 수신 조합을 운용하는 것이 더 유리하다. 또한 VDS송신-TASS수신 조합은 운용수심을 변경할 수 있기 때문에 다양







(b) 표적수심 100 m에서 VDS송신-TASS수신 조합의 신호초과

한 심도의 표적탐지에 유리하다. 본 논문에서는 소용돌이 가존재하는 해양환경에서 수상함 운용 복합소나시스템 중 운용수심 변경이 가능한 VDS송신-TASS수신 조합의 경우 를 고려하였다. 이처럼 수상함에서 운용 소나의 최대탐지 거리에서 음파가 도달하지 않는 null 구간이 차지하는 비 율이 커질수록 표적 탐지가 제한된다. 이러한 이유로 대잠 수함 작전임무를 수행할 때 소나의 최대탐지거리뿐 아니라 누적탐지거리도 함께 고려되어야 한다.

# 3.5 중규모소용돌이에서의 탐지성능 변화

중규모 소용돌이에 의해 발생한 음속 변화에 따른 탐지 거리 차이 변화를 보기 위하여 음속은 종속 환경으로 두고, 해저 저질이나 수심은 독립 환경으로 가정하였으며 이를 통해 중규모 소용돌이가 탐지거리에 미치는 영향을 확인 하였다.

## 3.5.1 소용돌이 존재 유무 및 종류에 따른 탐지거리 변화

중규모 소용돌이에 의한 소나탐지성능 변화를 보기 위 해서는 소용돌이가 존재하지 않는 환경과 존재하는 해양환 경에서의 탐지거리 변화에 대해 보았다. 여기서 소용돌이 가 존재하는 환경을 가정하기 위해서 반경 23 km 난수성 소용돌이와 냉수성 소용돌이의 중심위치를 30 km로 고정 하였다.

Fig. 17(a)는 반경 23 km 난수성 소용돌이의 중심 위치가 30 km에 존재하는 환경을 나타내는 모식도이며, Fig. 17(b) 는 냉수성 소용돌이에서 동일한 환경이다. 소용돌이의 종 류는 난수성 소용돌이(W.E: Warm Eddy)와 냉수성 소용 돌이(C.E: Cold Eddy)로 나눠진다. 난수성 소용돌이의 중 심은 주변보다 수온이 높으며, 냉수성 소용돌이의 중심은 주변보다 수온이 낮은 것이 특징이다. Fig. 18에서는 이러한 3가지 환경에 따른 음속 구조를 비교하였다.

소용돌이가 존재하지 않는 환경과 난수성 소용돌이가 존재하는 환경, 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경에서의 음속 구조는 모두 다르게 나타난다. Fig. 18(a) 소용돌이가 존재하지 않는 환경의 최소음속층 깊이는 400 m로 기준 음속은 1,455 m/s이다. Fig. 18(b) 난수성 소용돌이가 존재 하는 환경에서의 최소음속층 깊이는 500 m로 기준음속 은 1,460 m/s 이다. Fig. 18(c) 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경에서의 최소음속층 깊이는 300 m로 1,448 m/s이다. Fig. 18(d)에서 수심 0~800 m 음속 구조를 비교하면 (1) 수 심 300 m, (2) 수심 400 m, (3) 수심 500 m에서 난수성 소 용돌이의 음속이 가장 빠르고, 그 다음은 소용돌이가 존재 하지 않을 때이며, 냉수성 소용돌이가 가장 느린 음속을 나



타냈다. (4) 수심 800 m 이상에서는 3가지 환경에서 유사한 음속 구조를 보였다. 지금부터 3가지 환경의 음속 구조 차 이에 따른 수중음파전달특성을 확인하였다.

Fig. 19는 소용돌이가 존재하지 않는 환경과 반경 23 km 난수성 소용돌이의 중심위치가 30 km에 존재하는 환경에 서 음선추적 결과이다. Fig. 19(a) 소용돌이가 존재하지 않 는 환경에서 음선들이 해저면을 맞지 않고 수렴대를 형성 하면서 전파되고 있다[17]. Fig. 19(b) 반경 23 km 난수성 소 용돌이의 중심위치가 30 km에 존재하는 환경에서는 대부 분의 음선들이 해저면 반사를 겪으면서 전달손실이 발생하 여 음선이 점차 사라지게 된다. Fig. 19(c) 냉수성 소용돌이 가 존재하는 환경에서는 난수성 소용돌이에 비해 음선이 수 렴되는 경향을 나타낸다.

Fig. 20(a)는 소용돌이가 존재하지 않는 환경에서의 신 호초과로 해저면을 맞지 않고 convergence zone을 형성 하면서 음파가 원거리까지 전달되는 현상이 보인다. 이에 반해 Fig. 20(b)는 난수성 소용돌이로 인해 음속 구조 변화 가 생기면서 음파가 bottom bounce path로 인해 전달손



Fig. 19. 소용돌이의 환경에 따른 음선추적 결과 비교

실이 증가하여 약 60 km 정도까지 탐지되다가 신호세기가 약해지면서 점차 사라지게 된다. Fig. 20(c) 반경 23 km 냉 수성 소용돌이가 중심위치 30 km에 존재하는 환경에서 난수성 소용돌이가 존재하는 경우보다 해저면 반사가 적게 발생하는 경향이 있다.

Fig. 21을 통해 소용돌이가 존재하지 않는 환경과 반경 23 km 난수성 소용돌이 중심위치가 30 km에 존재하는 환 경에서 표적수심 100 m의 최대탐지거리와 누적탐지거리 를 확인하였다. Fig. 21(a) 소용돌이가 존재하지 않는 환경 에서 최대탐지거리는 약 90 km, 누적탐지거리는 약 30 km 가모의되었다. Fig. 20(b) 반경 23 km 난수성 소용돌이 중 심위치가 30 km에 존재하는 환경에서의 최대탐지거리는 약60 km, 누적탐지거리는 약10 km가모의되었다. Fig. 20(c) 반경 23 km 냉수성 소용돌이 중심위치가 30 km에 존재하 는 환경에서의 최대탐지거리는 약70 km, 누적탐지거리는 약20 km가모의되었다.

이어서 소용돌이가 존재하지 않는 환경과 난수성 소용돌 이와 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경에서의 최대탐지거



Fig. 20. 소용돌이의 환경에 따른 신호초과 결과 비교

리와 누적탐지거리에 대해서 보았다. 본 논문에서 최대탐 지거리와 누적탐지거리의 평균 값을 고려하여 최대탐지거 리는 0 km - 100 km, 누적탐지거리는 0 km - 30 km 범위 로 설정 후 비교하였다.

KNST

Fig. 22를 보면 검정색 실선은 소용돌이가 존재하지 않 는 환경(N.E), 빨간색 실선은 난수성 소용돌이가 존재하는 환경(W.E), 파란색 실선은 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경(C.E)의 최대탐지거리와 누적탐지거리를 의미한다. Fig. 22(a) 소용돌이가 존재하지 않는 환경에서의 최대탐지 거리는 약 90 km로 일정하게 나타났으며, 난수성 소용돌이 의 중심위치가 30 km에 존재하는 환경에서 반경 20 km -26 km까지 최대탐지거리 약 80 km를 유지하다가 반경 27 km - 30 km에서 탐지거리가 약 60 km까지 떨어지는 것을 확인하였다. 반경 31 km 지점에서 최대탐지거리가 약 80 km, 반경 32 km 이후로 약 60 km로 떨어지다가 다시 약 80 km를 유지하였다. 반경 20 km - 40 km 냉수성 소용 돌이의 중심위치가 30 km 존재하는 환경에서의 최대탐지 거리는 약 70 km를 보이다가 반경 41 km에서 약 50 km로 거리가줄어드는양상을보였다. 반경 42 km 지점에서는 최 대탐지거리 약70 km를 유지하였다.



Fig. 21. 소용돌이의 환경에 따른 최대/누적탐지거리 결과

이를 요약하면, 소용돌이가 존재하지 않는 환경에서 최 대탐지거리가 일정하게 나타났으며, 난수성 소용돌이가 존 재하는 환경에서는 소용돌이의 반경이 커짐에 따라 최대탐 지거리가 감소되는 경향을 보였다. 냉수성 소용돌이가 존 재하는 환경에서는 소용돌이의 반경이 커지면서 최대탐지 거리는 소폭 감소를 보이나 전체적으로 보면 거의 변화가 없다는 것을 확인하였다. 소용돌이가 존재하지 않는 환경 에서 누적탐지거리는 약 30 km 값을 일정하게 유지하였다. 그러나 난수성 소용돌이의 반경이 커짐에 따라 누적탐지거 리가 감소되는 경향을 보였고, 냉수성 소용돌이의 반경이 커지면서 누적탐지거리는 중심위치 30 km 지점에서 1 km 증가한 후 1 km 미만의 범위에서 누적탐지거리가 약간 증 가하는 경향을 보였다.

다음은 3가지 환경에서의 탐지가능성을 비교하였다. Table 5는 소용돌이가 존재하는 환경, 난수성 소용돌이와 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경에서의 최대탐지거리와 누적탐지거리 및 탐지가능성을 제시한 표이다.



(a) 소용돌이가 존재하지 않는 환경(N.E), 반경 20 km - 48 km 난수성 소용돌이(W.E)와 냉수성 소용돌이(C.E)의 중심 위치가 30 km에 존재하는 환경에서의 최대탐지거리 비교





Fig. 22. 소용돌이의 3가지 환경에 따른 소나탐지거리 비교

Table 5. 소용돌이가 존재하는 환경, 난수성 소용돌이와 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경에서의 최대탐지거리, 누적탐지거리, 탐 지가능성 제시

구분	최대 탐지거리	누적 탐지거리	탐지 가능성
소용돌이가 존재하지 않을 때	92 km	27 km	29 %
난수성 소용돌이가 존재할 때	69 km	16 km	23 %
냉수성 소용돌이가 존재할 때	72 km	21 km	29 %

소용돌이가 존재하지 않는 환경에서의 최대탐지거리 는 약 90 km, 난수성 소용돌이가 존재하는 환경에서는 약 70 km, 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경에서는 약 70 km 를 나타냈다. 소용돌이가 존재하지 않는 환경에서의 누적 탐지거리는 약 30 km, 난수성 소용돌이가 존재하는 환경에 서는 약 10 km, 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경에서는 약 20 km가 계산되었다. 이 값을 통해 탐지가능성을 산출하게 되면 소용돌이가 존재하지 않는 환경과 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경에서 약 29 %, 난수성 소용돌이가 존재하는 환경에서는 약 23 %로 대략 6 %의 낮은 수치로 모의되었다.

이를 탐지가능성 측면에서 보면, 난수성 소용돌이가 존 재하는 환경에서는 소용돌이가 존재하지 않은 환경과 냉수 성 소용돌이가 존재하는 환경에서 보다 수중 표적에 대한 탐지가능성이 약 6 %가 떨어진다는 것을 확인하였다. 이처 럼 소용돌이가 존재하지 않는 환경과 난수성 소용돌이와 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경에서 탐지거리 차이가나 타났으며, 이를 통해 소용돌이라는 해양환경 요소가 소나 탐지성능에 영향을 미친다는 사실을 확인하였다. 지금부 터는 소용돌이의 반경, 중심위치에 따른 탐지성능 변동성 에 대해 자세히 살펴보았다.

## 3.5.2 소용돌이 반경에 따른 탐지거리 변화

다음으로 소용돌이의 반경에 따른 탐지거리 변화 양상 에 대해 확인하였다. 소용돌이는 20 km 이내의 작은 아중







규모부터 100 km 이상인 대규모까지 크기(반경)가 매우 다양하다. 그 중에서 동해 해역에서 연중 발생 빈도가 높은 중규모소용돌이를대상으로 평균통계특성을분석하였다. 본 논문에서는 반경 20 km - 48 km 범위 내 1 km 간격 에 해당하는 29개의 난수성 소용돌이를 대상으로 탐지거 리를 산출하였다. Fig. 23(a) 와같이 반경 20 km - 48 km 난 수성 소용돌이의 중심 위치를 각각 0 km, 30 km, 50 km, 70 km, 90 km에 고정시켜서 반경에 따른 탐지거리 변화를 보았다. Fig. 23에서 검정색 실선은 난수성 소용돌이의 중 심 위치가 0 km일 때, 반경 20 km - 48 km에서 나타난 최 대탐지거리이다. 빨간색 실선은 난수성 소용돌이의 중심 위치가 30 km일 때, 반경 20 km - 48 km에서 나타난 최대 탐지거리이다. 파란색 실선은 난수성 소용돌이의 중심 위 치가 50 km일 때, 반경 20 km - 48 km에서 나타난 최대탐 지거리이다. 연두색 실선은 난수성 소용돌이의 중심 위치 가 70 km일 때, 반경 20 km - 48 km에서 나타난 최대탐지 거리이다. 주황색 실선은 난수성 소용돌이의 중심위치가 90 km일 때, 반경 20 km - 48 km에서 나타난 최대탐지거 리를 의미한다.

소용돌이 중심위치가 0 km에 위치할 때 반경에 따른 최대탐지거리는 약 60 km이고, 중심위치가 90 km에 위 치할 때 반경에 따른 최대탐지거리가 약 60 km 정도로 거 의 변화가 없는 일정한 경향을 보였다. 소용돌이의 중심 위 치가 30 km에 위치하는 경우 반경이 20 km - 27 km일 때 최대탐지거리는 약 80 km 정도로 일정하였다. 28 km에 서는 최대탐지거리가 약 60 km로 감소하였고, 31 km가 되 는 지점에서 최대탐지거리가 약 80 km로 길게 모의되었 다. 반경 32 km에서는 최대탐지거리가 약 60 km로 나타났 고, 반경 37 km에서 최대탐지거리는 약 80 km로 모의되 었다. 여기서 반경 27 km - 38 km 구간에서 최대탐지거리 가 약 60 km와 약 80 km로 반복되어 모의되었다. 소용돌 이의 중심 위치가 50 km에 위치하는 경우 반경이 21 km -



50 km에 존재하는 환경을 나타내는 모식도

34 km까지 최대탐지거리는 약 80 km로 일정하였고, 반경 35 km에서 최대탐지거리는 약 60 km로 줄어들었다. 반경 36 km에서 최대탐지거리는 약 80 km로 다시 길게 나타나 다가 반경 37 km에서 최대탐지거리가 약 60 km로 짧게 모 의되었다. 반경 34 km - 39 km 구간까지 탐지거리가 길어 졌다가 짧아지는 경향을 반복하였다. 이는 소용돌이의 중 심 위치가 30 km에 위치할 때 반경 27 km - 38 km 구간에 서와 비슷한 양상을 확인하였다.

이러한 현상이 나타나는 이유를 파악하기 위해 Fig. 24(a) ①번 지점(반경 36 km, 중심위치 50 km)에서 값이 떨어 지는 부분의 신호초과를 확인하였다. Fig. 24(b) 누적탐지 거리를 보면 난수성 소용돌이의 중심위치가 0 km, 90 km 에 고정되는 환경에서는 반경에 관계없이 약15 km로 일정 하게 유지되었다. 난수성 소용돌이의 중심위치가 30 km에 고정되는 환경에서는 반경 20 km - 24 km 구간에서는 약 17 km로 나타났고, 반경 35 km - 48 km 구간에서는 약 20 km로 감소하는 경향을 보였다. 난수성 소용돌이의 중심 위치가 50 km에 고정되는 환경에서는 반경 20 km - 25 km 구간에서 약 20 km로 유지되었고 27 km - 48 km 구간에서 는 약 20 km로 감소하는 경향을 나타냈다. Fig. 25(a)에서 분홍색 점선으로 표시된 부분을 Fig. 25(b) 에서 확대하여 보면, 최대탐지거리 74 km 지점에서 발생하 는 약간의 null 구간으로 인해 설정한 거리(1 km)를 만족하 지못하게 된다. 즉, 솟은 봉우리 전체 부분을 보면 신호초과 0 이상의 값을 가지는 부분이 1 km를 초과하지만 그 사이에 설정한 거리(1 km)를 만족하지 못하는 약간의 null 구간이 식별되었다. 여기서 탐지거리 약 70 km를 유지하다가 그 사 이에 신호초과 0 미만의 구간이 포함되면서 약 60 km까지 탐지가 되는 경향을 확인하였다. Fig. 24(a) ② 번 지점(반경 41 km, 중심위치 30 km)에서 값이 떨어지는 부분의 신호초 과를 확인하였다.

Fig. 26(a)는 음원 수심이 100 m일 때 반경 41 km 난수 성 소용돌이의 중심이 30 km에 위치할 때 음파전달 모식도 이다. Fig. 26(b)에서 흰색 실선으로 동그라미 표시한 2개 부분은 음파가 굴절하며 수렴되는 구역으로 A에서 B지점 으로 갈수록 색깔이 옅어지고 있는데 이는 신호세기가 점점 약해지는 것을 의미한다. Fig. 26(b)를 보면 0 km - 56 km 구간에서 난수성 소용돌이의 영향이 나타나고 있다. 거리독 립 음속구조를 가정할 경우 일반적으로 음원 수심이 100 m 이면 음파가 굴절되며 수렴되는 구역이 동일한 수심 100 m











(b) 난수성 소용돌이의 중심 위치를 0 km, 30 km, 50 km, 70 km, 90 km에 고정시키고 반경 20 km - 48 km에 따른 누적탐지거리 변화



(b) 반경 36 km 소용돌이의 중심이 50 km에 위치하는 환경에서 null이 발생하는 74 km 지점에서 신호초과

에서 형성되게 된다. 그러나 난수성 소용돌이가 존재하게 되 면 음속이 빨라지기 때문에 음파가 굴절되며 수렴되는 구 역이 음원수심 100 m보다 아래에서 형성된다. 이로 인해 음파가 소용돌이가 존재하지 않을 때보다 신호초과 0 미만 값을 먼저 형성하게 되면서 난수성 소용돌이가 존재하는 환경에서는 탐지거리가 짧게 나오는 것이다.

## 3.5.3 소용돌이 중심위치에 따른 탐지거리 변화

소용돌이 중심위치에 따른 탐지거리 변화를 보기 위해 음원을 기준으로 소용돌이 위치에 대해 정의하였다. 이를 설명하기 위해 최소 반경값(20 km), 평균 반경값(33 km), 최대 반경값(48 km)을 기준으로 적용하였다. Fig. 27(a)는 음원이 소용돌이의 중심에 위치하는 환경으로 소용돌이의 전체 크기에서 1/2에 해당하는 지점에 음원이 있을 때이다. 여기서 반경 20 km 소용돌이가 중심에 존재할 때의 수평 위치는 0 km - 20 km이며 반경 33 km 소용돌이가 중심에 존재할 때의 수평위치는 0 km - 33 km이다. 반경 48 km 소 용돌이가 중심에 존재할 때의 수평위치는 0 km - 48 km이 다. 이 때 음파는 소용돌이 내부에서 내부로 전달되거나, 소 용돌이 내부에서 외부로 전달되는 양상을 나타낸다.

Fig. 27(b)는 음원이 소용돌이의 경계에 위치하는 환경 으로 소용돌이의 왼쪽 끝지점이 수평위치 0 km에 위치하



Fig. 28(a)는반경 20 km, 33 km, 48 km 경우 음원이 소용 돌이 외부에 위치하는 환경이며, Fig. 28(b)는 반경 20 km 경우 음원이 소용돌이의 외부에 위치하는 환경에서 연두 색 점으로 표시된 A는 소용돌이의 왼쪽 가장자리 끝지점으 로 수평거리 1 km - 100 km에 위치하면 외부 조건을 만족 하는 것이다. 여기서 A지점의 시작 위치에 따라 소용돌이 가차지하는 수평 위치가 달라진다. 이 때 음파는 소용돌이 외부에서 소용돌이 내부로 전파되는 양상을 띈다. 음원과 소용돌이의 위치에 따라 탐지성능 변화가 나타난다.

Fig. 29에서 소용돌이의 반경은 고정시키고 0 km -90 km 범위에서 1 km 간격으로 중심위치를 이동시키면서 탐지 성능 변화를 보았다. 이 때 반경 20 km - 48 km 소용돌이 중에서 10개의 소용돌이에 대한 탐지거리를 도출하였다. 그 결과 대부분이 유사한 그래프 형태를 보여주었다. 먼저

range 30 km, radius 41 km

음파가 굴절되며 수렴되는 구역



(a) 반경 20 km, 33 km, 48 km 경우 음원이 소용돌이의 중심에 위치하는 환경

Fig. 27. 음원이 소용돌이 중심/경계에 위치하는 환경에서의 모식도



소용돌이의 경계에 위치하는 환경

Fig. 29(a) 최대탐지거리를 살펴보면 4개 case 모두 가운 데가 사각으로 볼록한 마치 중절모 모양의 그래프 패턴을 나타냈다. 최대탐지거리는 소용돌이 반경이 커질수록 볼 록한 부분이 차지하는 폭의 비율이 점차 줄어들었으며, 반 경에 따라 볼록한 부분의 위치가 달라지는 것을 확인하였 다. 반경 26 km 경우는 30 km - 57 km 내에서 최대탐지거 리가 약 80 km가 모의되었고, 반경 33 km 경우는 33 km -54 km 내에서 최대탐지거리가 약 80 km가 모의되었다. 반 경 42 km 경우는 34 km - 46 km 내에서 최대탐지거리 약 80 km가 모의되었고, 반경 48 km 경우는 40 km - 50 km 내에서 최대탐지거리가 약 80 km가 모의되었다. Fig. 34(a) 에서 최대탐지거리 약 60 km가 계산되는 15 km 지점과 최 대탐지거리 약 80 km가 계산되는 15 km 지점과 최

Fig. 29(a) 산출된 최대탐지거리 결과에서 마치 중절모 모양의그래프패턴을 보이는 현상에 대해 음원과 소용돌이 위치에서 그 이유를 확인하였다. 음원과 소용돌이의 위치 를 크게 3가지로 구분하였다. 첫째, 난수성 소용돌이 내부에



Fig. 28. 음원이 소용돌이 외부에 위치하는 환경에서의 모식도



Fig. 29. 소용돌이의 환경에 따른 최대/누적탐지거리 결과

음원이 존재하는 환경이다. 둘째, 난수성 소용돌이가 중간 부분에 존재하는 환경이다. 셋째, 소용돌이가 최대탐지거 리 부분에 존재하는 환경이다. 각각의 환경에 대한 음파전 달 양상을 통해 탐지거리 변화를 분석하였다. Fig. 30(a)는 난수성 소용돌이 내부에 음원이 존재하는 환경을 나타낸 모식도이고, Fig. 30(b)는 이에 해당하는 최대탐지거리이 다. Fig. 30(c)는 수심 100 m에서 반경 26 km 난수성 소용 돌이 중심이 15 km에 존재하는 환경의 신호초과이다.

위에서 언급한 3가지 환경에 대한 음파전달 양상을 설 명하기 위해 모식도를 이용하였다. 여기서 소용돌이가 존 재하지 않을 때의 음속은 1,455 m/s로 난수성 소용돌이 가 존재할 때의 음속과 표층 부근 수심 30 m에서 음속을 1,500 m/s로 가정하였다. 일반적으로 난수성 소용돌이가 존재하지 않는 환경에서는 음원에서 발생된 음파의 음속 이 1,500 m/s로 수심 100 m에서는 음속이 1,500 m/s이 다. 음파가 전파되다가 음원에서의 음속구조가 동일한수 심 100 m에서 음파가 굴절되며 수렴되는 현상을 보인다. Fig. 31은 난수성 소용돌이의 내부에 음원이 존재하는 환경으로 소용돌이가 포함되어 있는 영역에서는 음원에서



발생되는 음파의 음속이 1,455 m/s에서 1,500 m/s로 변한 다. 음파가 전달되는 과정에서 굴절되며 수렴되는 2개 지 점인 A와 B가 형성된다. A와 B는 음원에서 발생된 음파의 음속(1,500 m/s)과 동일한 음속 지점에서 형성되기 때문 에 음속이 빠른 음원 수심 100 m의 윗부분(1,500 m/s)에 서 음파가 굴절되며 수렴되는 양상을 보이는 것이다.

Fig. 32(a)는 난수성 소용돌이가 중간 부분에 존재하는 환경을 나타낸 모식도이고, Fig. 32(b)는 이에 해당하는 최 대탐지거리이다. Fig. 32(c)는 수심 0 m - 300 m에서 반경 26 km 난수성 소용돌이 중심이 45 km에 존재하는 환경의 신호초과이다.

Fig. 33은 난수성 소용돌이의 중간 부분에 음원이 존재 하는 환경으로 음원에서 송신된 음파가 1,455 m/s 음속 으로 전파되다가 소용돌이의 영향으로 윗부분의 음속이 1,500 m/s로 빨라지게 되면서 소용돌이의 아랫부분에서 1,455 m/s 음속구조가 생성된다. A에서 음파가 굴절되며 수렴되는 지점이 형성되면서 신호세기가 약해지다가 소용 돌이의 영역을 벗어나자 다시 신호세기가 강해지면서 약 80 km까지 탐지가 되는 것이다. 즉, 소용돌이가 존재하는 영역에서는 음원 수심 100 m 아랫부분에서 음파가 굴절되 며 수렴되고, 소용돌이가 존재하지 않는 영역에서는 음원 수심 100 m 윗부분에서 음파가 굴절되며 수렴된다.

Fig. 34(a)는 난수성 소용돌이가 중간 부분에 존재하는 환경을 나타낸 모식도이고, Fig. 34(b)는 이에 해당하는 최 대탐지거리이다. Fig. 34(c)는 수심 0 m - 300 m에서 반경 26 km 난수성 소용돌이 중심이 70 km에 존재하는 환경의 신호초과이다.

Fig. 35는 난수성 소용돌이가 최대탐지거리 부분에 존재 하는 환경으로 A를 지나 B부터 소용돌이의 영향을 받기 시 작하면서 신호세기가 점점 약해진다. 이로 인해 C에서는 표적수심 100 m까지 음파가 충분히 도달하지 못하게 되 고, 음파가 굴절되며 수렴하는 구역이 아랫부분에 형성됨 에 따라 위와 같이 탐지가 안 되는 부분이 생기는 것이다.

앞의 내용을 요약하면, 일반적으로 소용돌이의 영향이 없으면 약 80 km까지 탐지가 된다. 그러나 난수성 소용돌 이 내부에 음원이 존재하는 환경에서는 소용돌이가 음원 에서 송신하는 음파의 음속에 영향을 준다. 난수성 소용돌 이가 중간 부분에 존재하는 환경에서는 소용돌이가 처음 과 끝부분이 아닌 중간 부분에만 영향을 미친다. 난수성 소 용돌이가 최대탐지거리 부분에 존재하는 환경에서는 소 용돌이가 끝부분에 영향을 미치게 됨에 따라 탐지거리에 변화가 나타나는 것이다.



15 km에 존재하는 환경의 신호초과

Fig. 30. ①번 환경에서 모식도/최대탐지거리/신호초과



Fig. 31. 반경 26 km 난수성 소용돌이의 중심위치가 15 km에 존 재하는 환경에서 음파전달 양상을 표현하는 모식도





Fig. 33. 반경 26 km 난수성 소용돌이의 중심위치가 45 km에 존 재하는 환경에서 음파전달 양상을 표현한 모식도



Fig. 35. 반경 26 km 난수성 소용돌이의 중심위치가 70 km에 존 재하는 환경에서 음파전달 양상을 표현한 모식도

환경에서 최대탐지거리의 오차범위 평균값은 약 24 km로 계산되었으며, 표준편차는 약 7 km이다. 냉수성 소용돌이 가 존재하는 환경에서 최대탐지거리의 오차범위 평균값은 약 30 km로 계산되었으며, 표준편차는 약 1 km이다. 평균 값은 난수성 소용돌이에서 더 짧았지만 표준편차로 인하여 탐지거리 오차범위의 최대값과 최소값은 난수성 소용돌이 에서 각각 더 길고, 더 짧게 계산되었다. 여기서 냉수성 소용 돌이에 비해 난수성 소용돌이가 존재하는 환경에서 탐지성 능 변화에 미치는 영향이 크다는 사실을 확인하였다. 난수 성 소용돌이가 존재하는 환경에서 누적탐지거리의 오차범 위 평균값은 약 9 km로 계산되었으며, 표준편차는 약 1 km 로 모의되었다. 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경에서 누 적탐지거리의 오차범위 평균값은 약6 km로 표준편차는 약 1 km로 계산되었다. 평균값은 난수성 소용돌이에서 더 길 었으며, 동일한 표준편차로 최대값은 난수성 소용돌이가 길 게나오고, 최소값은 냉수성 소용돌이가 더 짧게 산출되었다.

Table 7. 임의 생성된 소용돌이에서 산출된 최대탐지거리와 누적 탐지거리의 오차범위 평균값, 표준편차, 최소값, 최대값

구분	거리	평균값	표준편차	최소값	최대값
난수성 소용돌이	최대	24 km	7 km	7 km	46 km
(warm eddy)	누적	9 km	1 km	7 km	13 km
냉수성 소용돌이	최대	30 km	6 km	15 km	37 km
(cold eddy)	누적	6 km	1 km	3 km	10 km

위의 결과를 종합해보면, 최대탐지거리를 기준으로 난수 성 소용돌이가 존재하는 환경에서 소나 운용시 약 7 km -46 km 오차범위를 가지고, 냉수성 소용돌이가 존재하는 환 경에서 소나 운용시 약 15 km - 37 km 오차범위를 가지는 경향을 확인하였다. 누적탐지거리를 기준으로 난수성 소용 돌이가 존재하는 환경에서 소나 운용시 약 7 km - 13 km 오 차범위를 가지고, 냉수성 소용돌이가 존재하는 환경에서는 약 3 km - 10 km 오차범위가 발생하는 경향을 나타내었다. 이와같이소용돌이가존재하는환경에서는수온구조가영 향을받아수직방향및수평방향의해수중음속구조가변 동한다[18]. 이로 인해 소용돌이를 관통하여 전파하는 음파 는 소용돌이가 없는 경우에 비해 다르게 굴절하면서 전파되 기 때문에 탐지거리에 영향을 주게 되는 것이다. 이처럼 중 규모소용돌이는수상함에서대잠작전시고려되어야할중 요한 환경적 요인이다. 중규모 소용돌이 등을 포함하는 해 양 변동성이 큰 작전 해역에서 단일의 수상함이 소나 운용

3.5.4 임의 생성된 소용돌이에 의한 탐지거리 오차범위 제시

앞서 소용돌이의 종류, 반경, 중심위치에 따른 탐지성능 변화를 최대탐지거리와 누적탐지거리로 산출하여 살펴보 았다. 소용돌이의 종류는 난수성 소용돌이와 냉수성 소용 돌이로 구분하여 여기서 나온 수치를 가지고 소용돌이가존 재하지 않는 환경에서의 탐지거리와 비교하여, 수상함에서 소나운용시 해양환경에 따라 발생할 수 있는 오차범위에 대 해 제시하였다. Table 6에서는 통계적 수치를 구하기 위해 고려한 소용돌이에 따른 9가지 환경이다.

Table 6. 탐지거리 오차범위 산출시 고려된 환경조건

78	종류	환경 조건				
ΤŒ		반경		중심 위치		
	난수성(4) 냉수성(4)	26 km		0 km – 90km		
비너		33 km		0 km – 90km	5 km	
만경		42 km		0 km – 90km	간격	
		48 km		0 km – 90km		
중심 위치	난수성(5) 냉수성(5)	20 km – 48km	1 km 가격	0 km		
		20 km – 48km		30 km		
		20 km – 48km		50 km		
		20 km – 48km	<b>–</b> 1	70 km		
		20 km – 48km		90 km		

\* (): 환경조건의 경우 수

난수성소용돌이와 냉수성소용돌이의 반경에 따른 탐지 거리 변화를 보기 위해 4가지 반경(26 km, 33 km, 42 km, 48 km)을 고정시키고, 0 km - 90 km 거리에서 5 km 간격으 로 중심위치를 이동시켰다. 다음은 난수성 소용돌이와 냉수 성소용돌이의 중심위치에 따른 탐지거리 변화를 보기 위해 5가지 중심위치(0 km, 30 km, 50 km, 70 km, 90 km)를고 정시키고, 반경 20 km - 48 km 범위 내에서 1 km 간격의 29 개의 소용돌이를 적용하였다. 소용돌이의 반경에 따른 탐지 거리 변화에서는 290 case, 소용돌이의 중심위치에 따른 탐 지거리 변화에서는 152 case로 총 442 case를 이용하여 각 각의 탐지거리에 대한 오차범위를 산출하였다. Table 7은 임의 생성된 소용돌이에서 산출된 최대탐지거리와 누적탐 지거리에 대한 오차범위의 평균값, 표준편차, 최소값, 최대 값을 나타낸 표이다.

소용돌이가 존재하지 않는 환경에서의 최대탐지거리는 약 92 km, 누적탐지거리는 약 27 km로 모의되었다. 이를 기준으로 Table 7에서는 소용돌이가 존재하는 환경과 탐지 거리 오차범위를 비교하였다. 난수성 소용돌이가 존재하는 시 해양환경 특성을 반영한 탐지성능의 오차범위를 고려한 다면 표적에 대한 탐지가능성을 어느 정도 향상시키는데 도 움이 될 것으로 기대하여 본다.

# 4. 수치모델 자료를 활용한 연중 중규모 소용돌이 의탐지성능 변화

# 4.1 운용해역 선정

본 논문에서는 수치모델 자료를 활용한 연중 중규모 소 용돌이의 탐지성능 변화를 보기 위해 운용해역을 선정하 였다. 여기서 크게 2가지 사항이 고려되었는데 그 중 하나 는 중규모 소용돌이의 출현빈도가 높은 해역이어야 한다. 다른 하나는 CZ를 통한 장거리 탐지에 유리한 지형적 조건 을 가져야 한다.

#### 4.1.1 중규모 소용돌이의 분포확률이 높은 해역

소용돌이에 의한 음속 변화를 보기 위해서는 동해 남서 부 해역 내에서도 중규모 소용돌이의 분포 확률이 높은 해



(a) 울릉 난수성 소용돌이의 봄철 공간 출현빈도 변화

Fig. 36. 소나 운용해역의 선정 조건





역을 선정해야 한다. 해양 환경 기반 통합소나체계 최적 운 용조건 연구(2019)에 따르면, 소나시스템 운용조건을 변화 시킬 수 있는 수심 1,000 m - 2,000 m 해역에서 Fig. 36과 같이 5개 정점(P1~P5)을 선정하여 봄철에 따른 울릉 난수성 소용돌이의 분포확률을 분석하였다. 봄철에는 모든 정점에 서 소용돌이 분포 확률이 15 % 이상으로 높았으며, 공간적 으로 연중 내내 울릉 분지 북서쪽 정점에서 난수성 소용돌 이 분포 확률이 높게(약 15 % 이상) 나타났다. 이를 근거로 하여 동해 남서부 해역에 해당하는 10개의 grid point 중 난 수성 소용돌이의 분포 확률이 비교적 높은 5개 지점을 선별 하여 Fig. 36(b)에서 흰색 점선으로 나타내었다.

#### 4.1.2 CZ를 통한 장거리 탐지에 유리한 해저 지형적 조건

본 논문에서는 CZ를 통한 장거리 탐지를 목적으로 VDS 송신-TASS수신조합을 운용하였다. 이를 위해서 Fig. 37(b) 에서 흰색 실선으로 표시된 5개 grid point의 해저 지형적 요인을 보기 위해 ETOPO 자료를 활용하였다. 그 결과 Fig. 37에서와 같이 (a), (b), (c), (d)는 수심이 비교적 얕은



(b) 동해 남서부 해역에서 난수성 소용돌이의 분포 확률이 높은 지점



해역으로 대체로 불균형한 해저 지형을 나타냈다. 이로 인 해 음파가 하향 굴절되면서 해저면 반사가 발생하여 전달 손실이 커짐에 따라 CZ를 통해 장거리 탐지를 하는데 한계 점이 있다. 그러나 e해역은 수심이 2,200 m로 깊으며 비교 적 평탄한 해저 지형을 보이고 있다.

#### 4.1.3 선정 결과

본 논문에서는 위에서 언급한 2가지 조건을 모두 충족 하는 동경 131° 북위 37° 해역을 1개의 site를 정하여 동 해 역의 환경 자료를 기반으로 분석을 진행하였다(Fig. 38). ETOPO 자료를 통해 확인해 본 결과 수심은 2,200 m에 해 당하였으며, 표층 평균 입도는 관련 기관(한국지질자원연 구원, 국방과학연구소, 한국해양과학기술원) 및 한양대 학교 해양음향공학연구실에서 보유한 자료를 통해 Clay (9Ø)로 정하였다.

#### 4.2 HYCOM과 GDEM 모델

본 논문에서는 2001년 HYCOM 수치모델 자료를 통하 여 소용돌이의 탐지성능변화를 분석하였으며, 더 나아가 중규모 소용돌이가 반영되지 않은 GDEM 모델과의 비교 를 통해 중규모 소용돌이에 따른 탐지성능 변동성 차이를 살펴보았다.

Fig. 39(a) 재분석된 수치모델 음속 구조인 HYCOM 모 델은 미세한 해양현상까지 고려되어 3시간 단위로 존재하 기 때문에 중규모 소용돌이의 분포, 이동 등이 잘 모의되어 있다. 이와 다르게 GDEM 모델은 한 달에 한 개의 자료가 존재하여 중규모 소용돌이보다 더욱 큰 시간 규모의 해양 현상이 반영되어 있으며 중규모 소용돌이는 포함되어 있지 않은 음속 구조이다.

## 4.3 중규모 소용돌이에 따른 탐지성능 변화

중규모 소용돌이가 소나 탐지 성능에 미치는 영향을 확 인하기 위하여 2001년 HYCOM 수치모델 자료를 활용하 였다. 음원과 수신기의 위치를 동경 131°, 북위 37°로 고정 하고 음원과 수신기 수심 및 표적수심은 150 m로 설정하였 다. 주파수 대역은 3 kHz이며 VDS송신-TASS수신 조합으 로 소나를 운용하였다. 본 논문에서는 난수성 소용돌이 내 부에 음원이 존재하는 환경과 난수성 소용돌이 외부에 음원 이 존재하는 환경 그리고 냉수성 소용돌이 내부에 음원이 존재하는 환경에서의 소나 탐지성능 변화를 확인하였다.



# 4.3.1 방위별 탐지거리에 대한 설명

본 논문에서는 1개의 지점(동경 131°, 북위 37°)에서 45° 간격으로 8개의 방위별 탐지거리를 산출하였다. Fig. 40(a) 는 GDEM 모델의 1월 자료를 가지고 8개 방위별 탐지거 리를 나타내었다. Fig. 40(b)에서 가운데 점은 음원과 수 신기의 위치로 약 700 m 간격이다. 파란색 점선으로 표 시된 검정색 실선은 최대탐지거리를 의미하며, 8개 간격 은 45°씩 나눈 방위각으로 각각의 실선은 방위별 탐지거 리이다. Fig. 40(c)에서 끝에 표기된 수치는 방위별 최대 탐지거리이다.

## 4.3.2 난수성 소용돌이 내부에 음원이 존재하는 환경

Fig. 41(a)와 같이 음원이 난수성 소용돌이 내부에 존재 하게 되면 음파는 수온이 높고 음속이 빠른 위치에서 송신 된다. 난수성 소용돌이가 존재하는 환경에서는 소용돌이 내부에 해당하는 표층에서 수백미터까지의 수심에서 음 속이 빠른 구역이 형성된다. 음파는 음속이 빠른 곳에서 낮



(a) GDEM 모델(1월 자료)에서 방위별 탐지 결과



(b) 방위별 탐지거리를 나타내는 모식도에 대한 설명



(c) 방위별 산출된 최대탐지거리 Fig. 40. 산출된 방위별 탐지결과에 대한 구체적 설명 은 곳으로 굴절되기 때문에 송신된 음파는 소용돌이 외부 로 전파되며 음속이 빠른 표층에서 해저면으로 강하게 굴 절된다. 본 논문에서는 실제 해양환경과 유사한 음속구조 를 가진 HYCOM 모델 자료를 통하여 소용돌이의 반경에 따른 탐지거리 변화양상에 대해 확인하였다. Fig. 41(b)는 표적수심 150 m에서 방위별 산출된 최대탐지거리이며, 그 중 가장 짧은 탐지거리를 나타내는 180° 방위각에서 탐지 확률을 살펴보았다. Fig. 41(c)에서 보면 일반적으로 강한 하향굴절을 겪은 음파는 큰 수평 입사각으로 해저면에 입 사되기 때문에 큰 해저면 반사손실을 가지며 장거리 전파 되기 어려운 전달 특성을 보인다. 또한 모든 방위에서 큰 하 향굴절을 겪으며 탐지거리가 짧게 도출되는 것을 확인할 수 있다.

# 4.3.3 난수성 소용돌이 외부에 음원이 존재하는 환경

VDS송신-TASS수신 조합으로 동해에서 탐지를 수행할 경우 장거리 탐지를 위하여 최소음속층을 활용한다. 최소



(a) 표적수심 150 m에서 HYCOM 결과 그림 (2001. 10. 25.)



(b) 난수성 소용돌이 내부에 음원이 존재하는 환경에서의 방위별 탐지거리



(c) 표적수심 150 m에서 난수성 소용돌이 내부에 음원이 존재하는 환경의 180° 방위 탐지확률

Fig. 41. 난수성 소용돌이 내부에 음원이 존재하는 환경에서의 탐 지 성능

42

음속층을 통하여 음파가 전달될 경우 경계면에서의 손실이 최소화되기 때문에 장거리까지 전파가 가능하다. 음파는 송신 위치에서의 음속과 송신각으로 결정되는 특정한 음속 보다 느린 음속층을 통하여 전파된다. 이 때 난수성 소용돌 이가 존재하게 되면 결정된 특정 음속보다 빠른 영역이 생 성되어 음파가 소용돌이 내부로 전파되지 못하고 하향 굴 절하는 현상이 발생한다.

Fig. 42(a)는 HYCOM 1월 자료로 여기에서 315° 방향 의 약 40 km 위치에 난수성 소용돌이가 존재하기 때문에 Fig. 42(c)에서 음파가 표적 수심 150 m까지 전파되지 못하



(b) 난수성 소용돌이 외부에 음원이 존재하는 환경에서의 방위별 탐지거리



음원이 존재하는 환경의 신호초과

Fig. 42. 난수성 소용돌이 외부에 음원이 존재하는 환경에서의 탐지 성능

고 하향 굴절되어 Fig. 42(b)과 같이 탐지거리가 짧게 분석 되는 현상이 잘 나타나 있다. 하지만 135°를 보면 난수성소 용돌이가 존재함에도 불구하고 다른 방위각과 유사한 탐 지거리로 분석되며 이것은 난수성 소용돌이가 존재하지만 음원 위치에서의 음속과 소용돌이 내부의 음속 차이가 크 지 않기 때문에 음파가 하향 굴절되지 않고 소용돌이 내부 로 전파된 현상이다. 즉, 난수성 소용돌이가 발생하더라도 음원 위치에서의 음속과 소용돌이 내부 음속이 큰 차이가 없다면 탐지 성능에 큰 영향을 미치지 않을 수 있다.

#### 4.3.4 냉수성 소용돌이 내부에 음원이 존재하는 환경

냉수성소용돌이내부에 음원이 존재할 경우에 Fig. 43(a) 와 같이 음원 위치에서의 음속은 일반적으로 냉수성 소용 돌이가 존재하지 않을 경우보다 느리게 형성된다. 따라서 음파는상대적으로 소용돌이가 존재하지 않을 때보다 적은 하향 굴절을 겪으며 최소음속층을 통한 음파 전달에 유리 한 환경이 조성된다. 따라서 낮은 음속을 갖는 구역을 통하





(b) 냉수성 소용돌이 내부에 음원이 존재하는 환경에서의 방위별 탐지거리



Fig. 43. 냉수성 소용돌이 내부에 음원이 존재하는 환경에서의 탐지 성능

여 음파가 장거리까지 전파되기 쉬우며 Fig. 43(b)에서 나 타나듯이 탐지 거리 또한 길게 도출된다. 그러나 Fig. 43(c) 와 같이 전파 도중에 상대적으로 음속이 빠른 구간을 지나 게 되면 하향굴절을 겪어 음파가 표적 수심까지 도달되지 못하기 때문에 냉수성 소용돌이가 존재할 경우의 탐지성능 은 환경의 영향을 크게 받게 된다.

# 4.3.5 중규모 소용돌이에 의한 탐지변동성 확인

본 논문에서는 1년에 대하여 중규모 소용돌이가 존재하 지 않을 경우로 GDEM 음속 구조를 분석하였고 중규모 소 용돌이가 존재하는 경우로 HYCOM 음속 구조를 분석하였 다. 그후두 결과를 비교하여 중규모 소용돌이를 고려하지 않고 도출한 탐지거리와 중규모 소용돌이를 고려한 탐지거 리의 차이점을 확인하였다. 이 때 탐지거리 결정방법은 CZ 환경의 탐지에 적합한 maximum detectable range로 결 정하였다.

Table 8은 울진 동방 146 km 해역(동경 131°, 북위 37°) 에서 45°의 방위 간격에 대하여 1년간의 탐지거리를 계산 한 결과 GDEM 음속 구조의 탐지거리 평균은 약 75 km이 고표준편차는 약 16 km로 계산되었으며 GDEM은 한달간 격으로 분석되었다. HYCOM 음속 구조에서 탐지거리 평 균은 약 62 km이고 표준편차는 약 23 km로 계산되었으며, 5일 간격으로 분석된 결과이다. 평균값은 HYCOM 음속 구 조에서 더 짧았지만 큰 표준 편차로 인하여 탐지거리 최대 값과 최소값은 HYCOM에서 각각 더 길고, 더 짧게 계산되 었다. 즉, 중규모 소용돌이를 고려하지 않고 계산된 탐지거 리와중규도 소용돌이를 고려한 탐지거리의 변동성 차이를 통하여 소나탐지성능 분석에서 중규도 소용돌이를 고려해 야함을 알 수 있다. 다만 이 결과는 한 위치에서 단순한 비교 를 통해 구해진 값이다.

Table 8. 중규모 소용돌이가 존재하지 않는 환경(GDEM)과 존재 하는 환경(HYCOM)의 탐지거리 비교

구분	평균값	표준편차	최소값	최대값
GDEM	75 km	16 km	41 km	103 km
HYCOM	62 km	23 km	21 km	118 km

# 5. 결론 및 해군에서의 활용방안에 대한 토의

본 논문에서는 해양 환경과 수상함 운용 복합소나시스 템의 운용방식에 따라 변동하는 소나탐지성능을 분석하 였다. 수상함 운용 복합소나시스템은 단일의 수상함에서 여러 개의 소나를 조합하여 운용함으로써 표적 탐지 거리 를늘리고 탐지 효율을 증가시킬 수 있다. 소나시스템의 탐 지가능성 측면에서 보면 잠재적 대잠 위협이 큰 동해 해역 에서 표층 뿐 아니라 중층 및 심층에서 표적 탐지가 유리하 고, CZ를 활용한 장거리 탐지를 하기 위해서 HMS송신 -HMS수신 조합보다 누적탐지거리와 탐지가능성이 높 은 VDS송신-TASS수신 조합으로 운용하는 것이 더 적합 하다고 확인하였다.

그러나 아무리 좋은 소나시스템이 개발되었다고 하더 라도 해양환경 변동성에 맞게 운용을 해야 제 성능을 발휘 할수 있다. 중규모 소용돌이는 넓은 규모에 걸쳐 급격한 수 온 구조 변화를 야기하는 해양 현상이며 탐지 성능에 큰 영 향을 미치게 되므로 소나시스템 운용에 있어 필수적으로 고려되어야 할 요인이다. 실제 해양환경과 유사한 음속구 조를 가진 HYCOM 수치모델 자료에서 난수성 소용돌이가 존재하는 경우에는 표층에서 수백 미터까지 수심에서 음속 이 빠른 구역이 형성된다. 이로 인해 강한 하향 굴절을 겪은 음파는 큰 수평 입사각으로 해저면에 입사되기 때문에 큰 해저면 반사손실을 가지며 장거리 전파되기 어려운 전달 특성을 보인다.

본 논문에서는 3가지(MUNK, HYCOM, GDEM) 음속 구조를 통해 중규모 소용돌이의 종류, 반경, 중심위치에 따 른 탐지거리 변화 양상에 대해 도출하였으며, 이에 따라 탐 지거리 변화가 발생한다는 사실을 확인하였다. 여기서 총 442 case를 적용하여 난수성 소용돌이와 냉수성 소용돌이 가 존재하는 환경에서 최대탐지거리와 누적탐지거리 오차 범위의 평균값, 표준편차, 최소값, 최대값을 제시하였다. 이를 바탕으로 대잠수함 작전시 소나탐지성능에 대한 오차 범위를감안하여운용함에따라표적에대한탐지가능성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 해군이 일일 대잠 탐지 예보시 탐지가능성 개념 도입을 통한 예보의 정확성 을 높일 수 있다. 즉, 현재는 탐지되는 않는 null 구간을 포 함한 최대탐지거리를 사용하고 있으나 탐지가능성을 적용 하면 탐지되는 구간만을 고려한 누적탐지거리까지 반영하 므로, 수상함에서 실제 표적에 대한 탐지 가능 정도를 확률 적 수치로 정확히 알 수 있다. 다만 이 결과는 한 위치에서 모델링 및 시뮬레이션(M&S: modeling & simulation) 기 법으로 구해진 값이므로, 수상함 운용 복합소나시스템에 적용하기 위해서는 다양한 위치에서 해양환경을 반영한소 나탐지성능에 대한 데이터베이스 구축작업이 필요하며 향 후관련 연구를 진행할 예정이다. 이와 같은 포괄적 자료를 통해탐지성능을 일반화시킨다면대잠수함작전시참고자 료로활용될 수 있다.

시공간적 변동성이 심한 해양현상을 반영하여 소나탐지 성능 변화를 예측하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 현재 해 군에서도 중규모 소용돌이에 관한 데이터베이스나 분석자 료가 부족한 실정이다. 앞으로 소용돌이 외에 동한 난류, 해 류의 사행 등의 중규모 변동성을 고려한 관련 연구가 이루 어져야 한다. 이를 통해 다양한 해양환경이 반영된 소나탐 지성능에 대한 데이터베이스를 활용한다면 향후 해군에서 성공적인 대잠수함 작전을 수행하는데 많은 도움이 될 것 이다.

# 참고문헌

[1] A. D. Waite, "Sonar for Practising Engineers, 3rd edition", WILEY and SONS, UK, pp. 119–124 (2002).

[2] J. W. Choi, K. S. Yoon, J. Y. Na, J. S. Park, and Y. N. Na, "Shallow water high-frequency reverberation model", J.

Acoust. Soc, Kr. 21, pp. 671-678 (2002).

[3] A. D. Waite, "Sonar for Practising Engineers, 3rd edition", WILEY and SONS, UK, pp. 125–140 (2002).

[4] M. B. Porter, "Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields", Journal of the Acoustical Society of America Vol. 82, No. 4, pp. 1349–1359 (1987).

[5] P. J. Mcdowell, "Environmental and Statistical Performance Mapping Model for Underwater Acoustic Detection Systems" (2010).

[6] W. Munk, P. Worcester and C. Wunsch, "Ocean Acoustic

Tomography : A scheme for large monitoring, Deep–Sea Res", 26, pp. 123–161 (1970).

[7] 국립해양조사원, "우리나라의 해양 영토", (2010).

[8] 임세한, "동해 북부해역의 수중음파전달 변동성,"

한국군사과학기술학회지 10.4. pp. 52-61 (2006).

[9] J. C. McWilliams, "The Nature and Consequence of Oceanic Eddiies, Ocean Modeling in an eddying Regime," Grophys,

Monogr, Vol. 177, Amer Geophys, Union, 5–15 (2008).

[10] 장한태, "난수성 소용돌이에서 쌍방향 음선추적 기법을 이용한

수중표적 탐지에 관한 연구", 석사학위논문, 한양대학교, 서울 (1997).

[11] 안덕수, "동해의 난수성 와동류내에서 표적탐지 거리 예측에 관한 연구", 석사학위논문, 국방대학교 군사과학대학원 (1999).

[12] 이상호, "독도 냉수성 소용돌이의 이동이 동한난류 변동에 미치는 영향",석사학위논문, 군산대학교, 군산 (2018).

[13] D. A. Mitchell, W. J. Teague, M. Wimbush, D. R. Watts and G. G. Sutyrin, "The Dok Cold eddy", J. Physic. Oceanogr, 35, pp. 273–288. (2005)

[14] 이경재, "저해상도 해면고도 자료로부터 도출한 동해의 중규모 소용돌이 : 탐색 알고리즘과 소용돌이 특성의 통계적인 분석", 석사학위논문, 서울대학교, 서울 (2013)

[15] 국방과학연구소, "해양 환경 기반 통합소나체계 최적 운용조건 연구 최종 보고서", (2019).

[16] C. S. Ahn and S. Y. Oh, "Gaussian Model Optimization using Configuration Thread Control In CHMM Vocabulary Recognition. Journal of Digital Polic and Management, 10(7), pp. 167–172 (2012).

[17] 김원기, "동해에서 난수성 소용돌이의 원거리 음파전달에 미치는 영향", 한국음향학회지 제34권 6호, Vol 34. No. 6, pp. 455-462 (2015).

[18] 김봉채, "동해에서 저주파 음파전파에 미치는 난수성 소용돌이의 영향", Ocean and Polar Research, Vol 34(3). pp. 325-335 (2012)