

잠수함 경로 추정 및 소노부이 투하 패턴 최적화를 위한 시뮬레이터 개발

정재호^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 국방AI센터

Development of a Simulator for Submarine Path Estimation and Optimization of Sonobuoy Deployment Patterns

Jaeho Jeong^{*,1)}

¹⁾ Defense AI Center, Agency for Defense Development, Korea

(Received 2 May 2024 / Revised 30 July 2024 / Accepted 7 August 2024)

Abstract

Due to specificity in the underwater environment, the difficulty of detecting submarine and the threat of submarine are increasing. The probability of detecting a submarine can be increased by estimation submarine path and optimizing sonobuoy deployment. In this paper, marine data collection, dynamics of submarine, submarine tracking path modeling, acoustic wave propagation modeling, detection probability modeling are applied in the simulator as similar to reality as possible. A simulator is developed to design submarine path estimation and sonobuoy deployment optimization scenario and to check result according to the scenario.

Key Words : Simulator(시뮬레이터), Sonobuoy Deployment Optimization(소노부이 투하 패턴 최적화), Submarin Path Estimation(잠수함 경로 추정)

1. 서론

잠수함은 수중에서 원하는 지역으로 은밀히 기동하여 목표지점을 타격할 수 있는 무기체계이다. 잠수함의 은밀성에 더해서 최근 SLBM 같은 핵무기를 탑재할 수 있으므로 잠수함의 위협성을 점점 증가하고 있다. 잠수함 위협성에 대비하기 위해 우리 군은 선제적

으로 잠수함을 탐지하여 조치해야 한다.

적 잠수함을 탐색할 때, 해상초계기에서 음향센서의 한 종류인 소노부이를 투하하고 이에서 얻은 음향신호를 분석하여 수행한다. 하지만 해상초계기가 탑재할 수 있는 소노부이 개수는 제한되어 있고 소노부이의 탐색범위도 협소하여 광활한 해양공간 전체를 탐색하기는 힘들다. 적 잠수함의 탐지확률을 높이기 위해서는 적의 이동경로를 추정하여 탐색공간을 축소하고 축소된 탐색 공간에서 소노부이를 최적화된 배치로 투하하여 작전을 수행해야 한다.

* Corresponding author, E-mail: 177045@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

적 잠수함의 이동경로를 추정하고, 해양환경을 고려하여 소노부이를 최적화로 배치하는 것은 실제 해양 환경에서 수행하기에는 어려움이 있다. 적 잠수함의 이동경로를 적에게 받을 수 없을뿐더러 소노부이를 투하하는 작업은 높은 비용을 요구하기 때문이다.

이를 해결하기 위한 대안은 적 잠수함과 해양환경 및 소노부이 센서 특성을 실제적으로 모사하는 시뮬레이터를 개발하고 이를 활용하는 것이다. 실제적 시뮬레이션은 적 잠수함의 임무 및 기동 패턴, 해저지형, 수온 등과 같은 해양환경, 그리고 음향전파와 소노부이 센서에서의 음향신호 수신을 모사해야 한다.

이와 관련하여 음파를 이용한 표적 탐지에 대한 시뮬레이션 연구개발은 지속적으로 수행되고 있다^[2,3]. 선행연구^[2]는 어뢰에서의 표적신호 생성 모델링을 생성하였고 해상에서 존재하는 어선, 상선, 구축함, 잠수함의 기동 및 소음원 준위를 설정할 수 있도록 했다. 음파의 물리적, 화학적 손실을 같이 고려하였다. 수동 소나 시뮬레이터^[3] 연구에서는 함정을 기동 모듈, 소음원 모듈, 소음 전달 모듈로 나누어서 수동 소나 시뮬레이터의 알고리즘을 제시했다. 앞선 선행연구에서는 어뢰 및 잠수함에서 수신되는 음파를 분석하기 위한 시뮬레이터에 대한 모델링을 제안했다. 이를 위해 수중 음파 전달을 모델링 하였고 물체 종류에 따른 소음에 대해서도 같이 모델링을 수행하였다. 두 선행 연구는 음파에 대한 전달 모델링, 위치에 따른 확률 등에 계산은 수행하였으나 음파를 받는 주체는 하나의 물체(잠수함 또는 어뢰)로 다수의 소노부이를 투하하여 잠수함을 탐지하는 것에 사용하기에는 한계가 있다. 또한 소노부이는 원하는 위치에서 투하할 수 있기 때문에 최적의 위치에 투하하는 것도 위의 선행연구에서 수행할 수 없다.

본 시뮬레이터는 위의 선행연구와 달리 추적하는 잠수함의 이동경로를 생성하며, 음파 전달 모델링과 소노부이가 다수일 때를 고려하여서 잠수함을 탐색할 수 있다. 2장에서는 시뮬레이터를 구성하는 시뮬레이션의 시나리오에 대한 정의, 3장에서는 시뮬레이터를 구성하는 요소들에 대한 모델링, 4장에서는 구현한 시뮬레이터에 대한 동작에 대해서 추가적으로 기술한다.

2. 시뮬레이션 구조 및 시나리오 설정

본 장에서는 잠수함 이동 경로 추정과 소노부이 투

하 최적화를 위한 시뮬레이션 구조를 정의하고 시뮬레이터에 필요한 요소들을 정의한다.

2.1 시뮬레이터 구조

본 시뮬레이터는 잠수함의 경로생성을 위한 잠수함 기동/경로추정 시뮬레이션 모듈과 소노부이 투하를 최적화하기 위한 소노부이 투하 시뮬레이션 모듈이 있다. 통합시험 통제모듈로 해당 모듈들을 관리한다. 잠수함 경로 생성, 소노부이 투하패턴 생성은 계산량이 많아 각 모듈이 아닌 고성능의 컴퓨터로 데이터를 전송하여 계산한다. 시뮬레이터의 자세한 구조는 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 잠수함의 경로 추정, 소노부이 투하 패턴 최적화는 다음 장에서 자세히 확인할 수 있다.

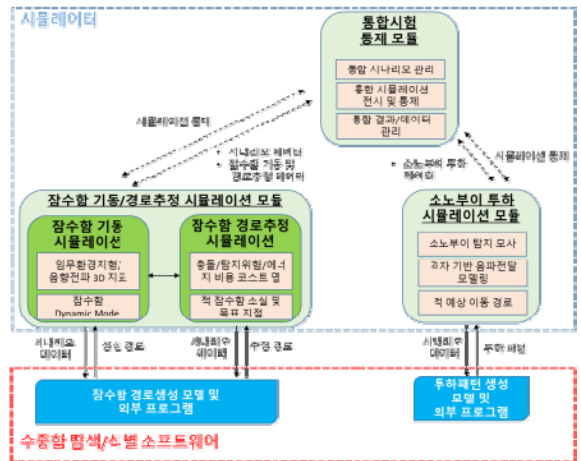


Fig. 1. Structure of simulator

2.2 잠수함 이동 경로 추정

잠수함 경로계획이 입력이 되는 시나리오 요소로 상대국의 선박 및 감시 센서의 위치, 어망 및 해양 물체 등의 장애물의 위치, 잠수함의 이동 오차를 줄이기 위한 지물 등 특징 참조점, 잠수함이 이동할 수 없는 금지 구역을 설정할 수 있게 하였다. 잠수함은 위 요소들을 고려하여 충돌비용, 탐지위험 비용, 에너지 비용을 추산하며 해당 비용들을 조합하여 최적화를 수행하는 것으로 가정하였다.

- 충돌 비용: 잠수함 이동 시 충돌할 수 있는 위험 비용이다. 해저의 지형, 어망, 어선, 상선, 해저 생물과의 거리가 특정 수치 이하일 때, 거리에 따라 비용이 증가하는 것으로 정의하였다.

- 탐지위험 비용: 잠수함이 상대군의 감시 센서에 탐지될 수 있는 위험 비용이다. 감시 센서로 상대군의 감시정찰함에 장착된 탐지 센서, 위치 고정형 항만 감시체계, 등대 등을 고려하였고 센서가 밀집하여 배치된 구역은 금지구역으로 두었다. 탐지위험은 음향센서는 음파전달 모델에 의한 신호 수신 세기, 비음향 영상센서는 가시거리를 기반으로 모델링 하였다.
- 에너지 비용: 잠수함의 이동 경로에 따른 배터리와 연료의 소모 비용이다. 수심, 해류, 속도에 따라 배터리 소비량을 모델링했고 배터리의 경우는 배터리 충전은 스노켈⁴⁾(잠수함을 수면 가까이 이동하여 해상위로 마스트를 올려 외부 공기 흡입 및 배터리를 충전하는 상태)시에 연료를 사용하여 수행하는 것으로 하였다.

잠수함은 작전영역의 충돌 및 탐지위험 요소들을 식별하여 알고 있다고 가정했지만 잠수함이 출발하고 나서 미식별 및 동적 발생 위험을 일정거리 이내에서 식별하여 경로 재계획을 수행하는 시나리오도 시뮬레이터에 반영했다.

2.3 소노부이 투하 패턴 최적화

본 시뮬레이터는 적 잠수함 탐색 작전 시나리오를 설정하여 소노부이 투하 패턴 최적화를 수행할 수 있다. 탐색 작전 시나리오의 구성요소로 적 잠수함 추정 경로 설정, 탐색 작전 구역 설정, 탐색 작전에 투입되는 해상초계기가 있고 해당 정보는 탐색할 때 전부 알고 있다고 가정한다.

잠수함을 선제적으로 발견하여 조치하기위해 작전영역을 설정했다. 해당 영역에서만 해상 초계기가 움직이고 소노부이를 투하할 수 있다.

설정된 작전구역에서 잠수함이 움직일 수 있는 예상 경로를 최대 5개를 설정할 수 있다. 각 예상 경로에서 잠수함이 이동속도를 조절할 수 있고 작전구역 in/out 시간의 데이터, 잠수함의 이동 방향도 조절할 수 있다.

탐색작전에 투입되는 해상초계기는 탑재할 수 있는 소노부이 개수는 정해져 있다. 또한 하나의 예상경로에 투하 가능한 소노부이의 개수도 제한되어 있어 투하 패턴을 생성할 때, 이를 반영해서 투하한다.

시뮬레이터는 소노부이가 투하패턴의 성능을 제공하기 때문에 소노부이가 투하된 위치에서의 탐지 확

률과 배치 방법에 따른 성능을 제공할 수 있다.

3. 잠수함 기동, 음파 전달, 소노부이 탐지 모델링

본 시뮬레이터에서 모델링하는 요소들은 해양환경에 영향을 받는다. 시뮬레이터의 신뢰성을 높이기 위해 실제 해양환경 데이터를 수집하였고 이를 모델링에 반영하였다.

잠수함의 실제적 이동을 모사하기 위해 잠수함의 경로 추종 및 동역학을 모델링했다. 잠수함 탐색을 위해 사용하는 소노부이의 탐지 기능을 모사하기 위해 잠수함에서 발생하는 음향신호의 해양환경에서의 전달을 모델링하였고 소노부이 센서단에서 획득된 음파의 세기를 모델링 하였다. 음파의 세기에 따른 소노부이의 탐지 확률을 고려하여 탐지기능을 모사하였으며 최종적으로 소노부이가 잠수함을 탐지할 수 있는 확률을 제공하였다.

3.1 해양환경 데이터 수집 및 적용

해양데이터를 수집해 시뮬레이터가 실 환경에서 연하는 것과 차이가 없도록 수행하도록 했다. 잠수함의 경로 계획할 때, 해저지형이 필요하고 에너지 소비량은 수심에 따른 해류에 영향을 받는다. 또한 소노부이의 음파 전달은 해저지형, 수온, 염도에도 영향을 받아 이에 대한 데이터도 같이 수집하였다.

수집된 데이터를 이용해서 잠수함의 경로 추정할 때, 잠수함의 심도가 해저지형보다 낮을 때, 잠수함이 심도 변경으로 인해 발각될 수 있어 잠수함의 심도보다 낮은 구역은 경로를 계획할 때 제외한다.

소노부이 투하패턴 최적화에서는 음파 전달 방식을 많이 이용하는데, 음파는 해수면과 해저면에 반사 및 수온, 염분, 수심에 의해 계산되는 음속의 영향을 많이 받는다.

본 시뮬레이터는 해양 데이터를 수집하고 각 시나리오에 적용하여 현실과 유사한 환경에서 알고리즘을 검증할 수 있다.

3.2 잠수함 다이내믹스

잠수함의 6자유도, 경로 추종, 연료 소비량의 잠수함 다이내믹스를 모델링하여 시뮬레이터에 반영했다. 잠수함의 다이내믹스를 이용하여 잠수함 경로 추정에 대한 현실과 유사한 데이터를 제공할 수 있다.

3.2.1 잠수함 6자운동 모사

잠수함 운동에 대한 선행연구^[5]를 기반으로 잠수함의 6자운동에 대한 모델링했다.

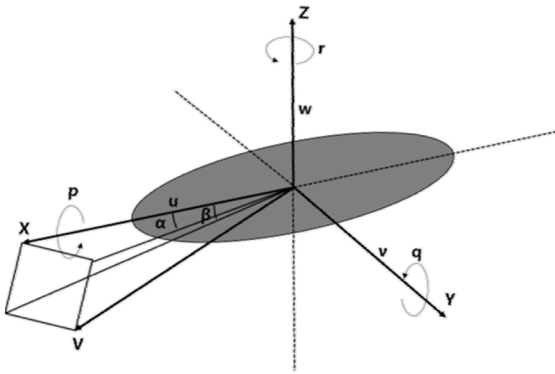


Fig. 2. Coordinate system of submarine

잠수함을 강체로 고려하여 6자 운동으로 다룰 수 있게 한다. 이후 잠수함의 운동을 정식화하기 위해 Fig. 2과 같이 동좌표계로 설정한다. 동좌표계의 중심과 무게중심의 차이를 반영하기 위한 위치벡터도 설정했다. 회전을 반영하기 위해 x, y, z 축으로 각속도를 적용했다.

위의 방식대로 일반적인 힘과 모멘트를 적용 후, 중력, 부력, 부가질량력, 점성감쇠유체력, 제어유체력을 반영했다. 중력을 적용할 때, 질량, 중력가속도, 공간 고정좌표계에서 연직 하방향 단위벡터, 공간 고정좌표계를 물체고정좌표계로 변환하는 매트릭스^[6] 및 Euler 각을 사용하였다. 부력은 유체의 밀도, 배수용적, 부력 중심의 위치벡터를 반영했다. 제어 유체력을 적용할 때, 타의 각도와 프로펠러의 추력을 적용하였다. 점성 감쇠유체력을 표현할 때, 적용되는 항은 유체력 미계수들이 많이 포함되었다. 위의 적용 방법은 선행 연구^[5]의 모델을 기술하였다.

본 연구에서는 점성감쇠 유체력에서 유체력 미계수 제약이 있어 이를 제거한 형태로 시뮬레이터에 적용하였다.

3.2.2 잠수함 경로 추종 모델

잠수함이 목표점으로 갈 때 지정된 경로점으로 이동을 기본으로 한다. 하지만 조류, GPS 센서 오류, 경로 재계획 등의 이유로 경로에 이탈하는 경우가 있다. 경로 추종을 통해 다시 잠수함이 경로로 이동할 수

있게 한다. 경로 추종은 비선형 적분인 Integral Line of Sight(ILOS) 기법^[7,15]을 사용했다. ILOS 기법을 이용하여 way point 목록에서 직선 경로를 생성하여 경로로부터 오차를 계산하여 오차를 줄이기 위한 타각을 제어하는 형태로 잠수함의 경로 추종을 시뮬레이터에서 수행한다.

3.2.3 잠수함 에너지 사용량 모델링

잠수함의 에너지 사용량을 아래의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$W(kWh) = P_D(kW) \times T(h) = 2\pi nQ \times T \quad (1)$$

식 (1)에서 Q는 프로펠러 토크, n은 프로펠러 회전수, T는 운항 시간을 나타낸다. 전체적인 프로펠러의 토크 값을 계산하기 위해 개방-해수 토크 계수 값을 이용한다. 개방-해수 토크 계수 값을 얻기 위해 아래 Fig. 3과 같이 프로펠러 단독특성 곡선의 값을 사용한다.

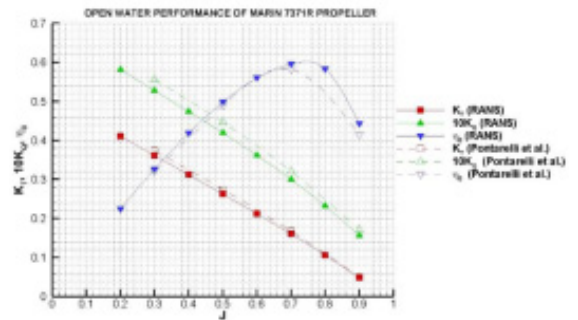


Fig. 3. Propeller characteristic curve of MARIN BB2^[8]

$$J = \frac{V(1-w_p)}{nD} \quad (2)$$

$$Q = \rho n^2 D^5 K_Q \quad (3)$$

식 (2)에서 J는 전진비, V는 선속, w_p 프로펠러의 반류계수, D는 프로펠러의 직경을 나타낸다. 선속, 반류계수, 프로펠러의 직경, 프로펠러 회전 수는 알고 있으므로 식 (2)을 통해 전진비를 계산할 수 있다. 전진비, Fig. 3을 이용해 개방-해수 토크 계수 K_Q 값을 구할 수 있다.

식 (3)에서 ρ 는 해수밀도를 나타내고 수심에 따른

해수밀도는 알수 있는 값이다. 식 (1)을 이용하여 잠수함의 운행시간에 따른 에너지 사용량을 계산하여 시뮬레이터에 적용했다.

3.3 음향전달모델 해석 방법

소노부이는 음파를 수신받아서 적을 탐색하는 센서다. 시뮬레이터에서는 수동형 소노부이를 기준으로 투하를 수행한다. 음파는 해저면 및 해수면에 반사, 투과되고, 음속에 따라 음파 굴절이 되므로 투하되는 위치에 따라 수신되는 음파의 세기가 달라진다. 월별 수온/염분(해상도 15'x15')^[17], 해저지형(해상도 1'x1')^[18], 일별 해류(0.08')^[19]은 오픈데이터를 수집하였고 해저질은 미적용, Muddy sandy gravel, Muddy grave, Clayey sand, Sandy mud, Clay로 사용자가 선택하도록 했다.

위치에 따른 음파의 세기를 계산하기 위해 수치적인 음향 전달 모델 해석을 사용했다. 음향전달모델에는 음선이론(BELLHOP), 정상모드(KRAKEN), 파수 적분 방정식(OASES), 포물선 방정식(RAMS) 등이 있다^[9-12]. 한반도 근해에는 해저면의 형상 및 해류의 흐름이 복잡하여 이를 수치적으로 예측하기 위해서 거리중속 모델이 필요하고 수동 소노부이는 광대역의 주파수의 소음을 수집하여 분석해야하므로 주파수에 따른 계산시간이 영향이 적은 음선 이론 방식을 선택하여 음향 전파 모델링을 했다. BELLHOP 음선이론에서의 음선 방정식은 아래와 같이 표현할 수 있다^[13,14].

$$\frac{dr}{ds} = c\xi, \quad \frac{d\xi}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{d\xi}{dr} \quad (4)$$

$$\frac{dz}{ds} = c\zeta, \quad \frac{d\zeta}{ds} = -\frac{1}{c^2} \frac{d\zeta}{dz} \quad (5)$$

위의 식에서 r, z는 원통 좌표계를 나타내고 있고, s는 음선 호의 길이를 나타낸다. c는 음속, $[\xi, \zeta]$ 은 음선의 탄젠트 벡터를 의미한다.

이를 이용하여 곡률 p와 음폭 q의 방정식은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dq}{ds} = cp, \quad \frac{dp}{ds} = -\frac{c_{nn}}{c^2} q \quad (6)$$

$$c_{nn} = c^2 \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \xi^2 - 2 \frac{\partial^2 c}{\partial r \partial z} \xi \zeta + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \zeta^2 \right) \quad (7)$$

c_{nn} 은 음선에 수직한 방향의 음선 구배를 나타낸다. i번째의 위치에서 음속의 기울기 g가 상수이고 거리 방향으로 음속의 변화가 없을 때, 음압의 크기 A와 도착 시간 t를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_i = \frac{1}{4\pi} \left| \frac{r_i}{\cos\theta_i} \sum_{j=1}^i \frac{(r_j - r_{j-1})}{\cos\theta_{j-i}} \right|^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$t_i = \sum_{j=1}^i \frac{1}{2g_{j-1}} \ln \frac{(1 + \sin\theta_i)(1 - \sin\theta_{j-1})}{(1 - \sin\theta_i)(1 + \sin\theta_{j-1})} \quad (9)$$

음파가 전달될 때, 위상 천이, 반사, 체적 흡수 손실을 같이 고려하였다. 위상 천이는 caustics, 해수면, 해저면 반사에 적용하였고 각각의 각도는 caustics 통과 (0.5π), 해수면 반사(π), 해저면 반사(α)로 설정했다. 위상차가 90도인 2개의 진폭이 같은 음원 신호를 생성하면, 두 신호의 조합으로 변화된 위상을 갖는 음원 신호를 생성할 수 있고, 해당 방식으로 푸리에 변환, 힐버트 변환을 거치지 않고 임의의 위상 천이를 구현할 수 있어, 연산시간을 감소하였다. 협대역 신호, ping, FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)신호는 시간 영역에서 생성하여 정확한 주파수를 구현하였다. 광대역 신호는 주파수 영역에서 90도 위상차를 가지는 2개의 신호를 생성하여 IFFT를 통해 시간신호로 변환했다.

음향 전달 모델을 통한 전달 손실은 이미 생성된 시간영역에서 대역 신호에 대하여 주파수별로 손실을 가지는 경우로 초기에 거리별로 주파수 특성을 적용한 필터를 생성하였고 거리 내에서 실시간 필터 계수를 특정 거리에 맞게 Catmull-Rom 보간법을 적용했다^[16].

아래의 Fig. 4-8까지 3.3장의 음파 전달 모델링을 적용한 결과 값이다. 해당 그림들을 통해 수심, 해저 지형, 해수면, 음속의 변화 등에 따라 음파 전달 모형이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

3.4 수동 소노부이 탐지 확률

3.3장에서 음파에 대한 모델링을 사용해 투하 위치에 따른 음파의 세기를 계산했다. 본 장에서는 음파에 세기를 이용하여 적 잠수함 탐지 확률을 계산하는 방법을 기술할 것이다.

소노부이가 투하된 위치에서 음파의 세기에 관련된 수동소나 방정식은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다^[12].

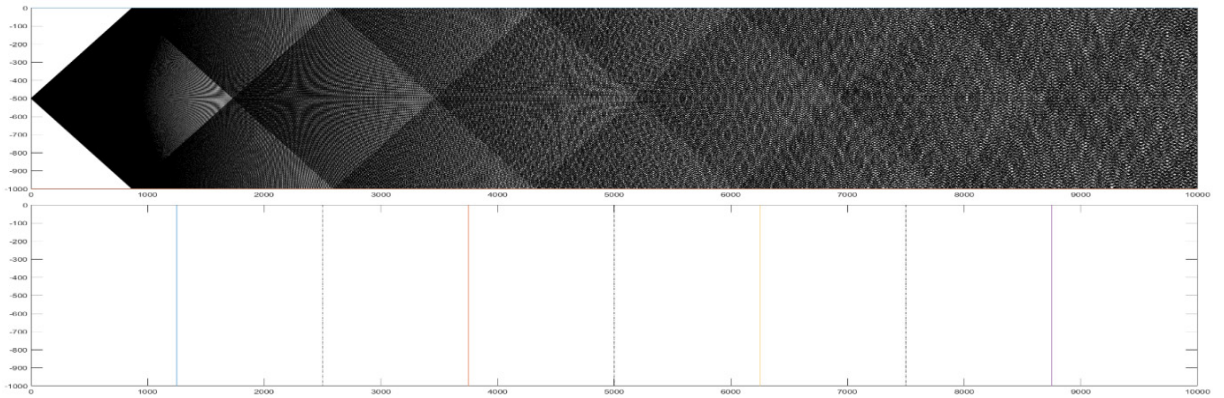


Fig. 4. Distance : 10 km, depth of ocean : 1000 m, sound source depth : 500 m, same speed of sound in 4 section

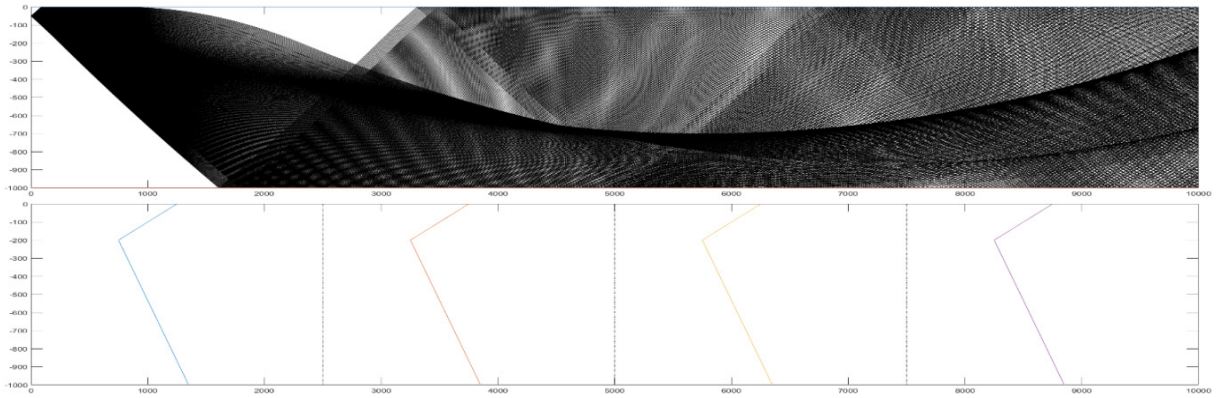


Fig. 5. Distance : 10 km, depth of ocean : 1000 m, sound source depth : 50 m, change in speed of sound by depth of ocean, change in speed of sound for each section, flat seafloor

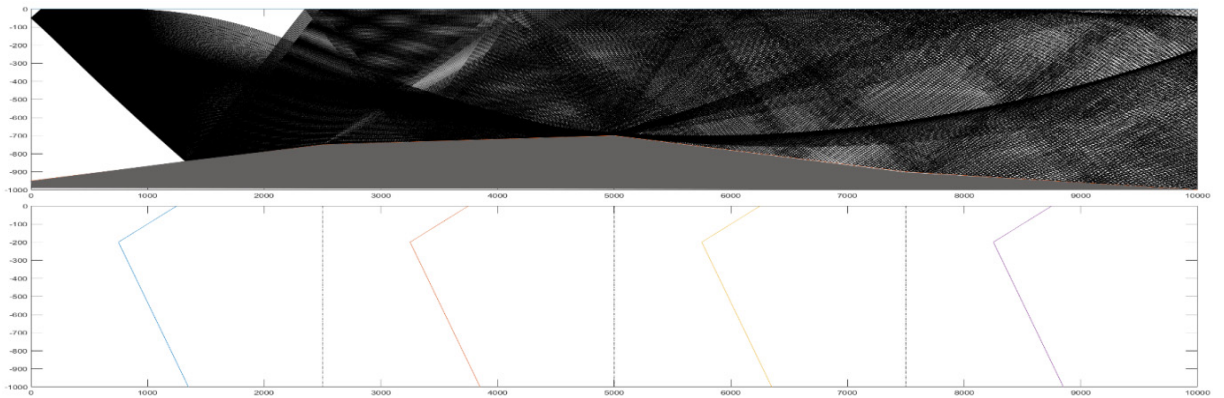


Fig. 6. Other conditions are same as in Fig. 5, the seafloor is curved

잠수함 경로 추정 및 소노부이 투하 패턴 최적화를 위한 시뮬레이터 개발

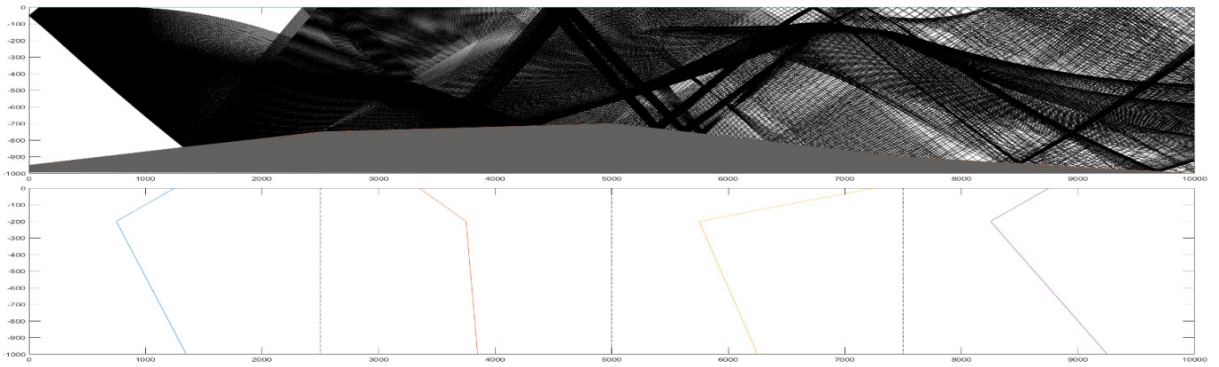


Fig. 7. In Fig. 6, the change in speed of sound is different for each section

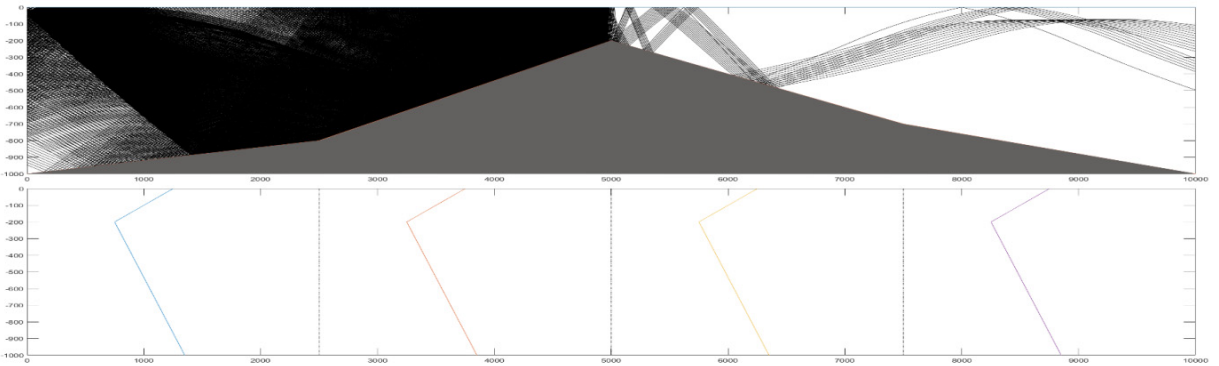


Fig. 8. In Fig. 6, the change in seafloor

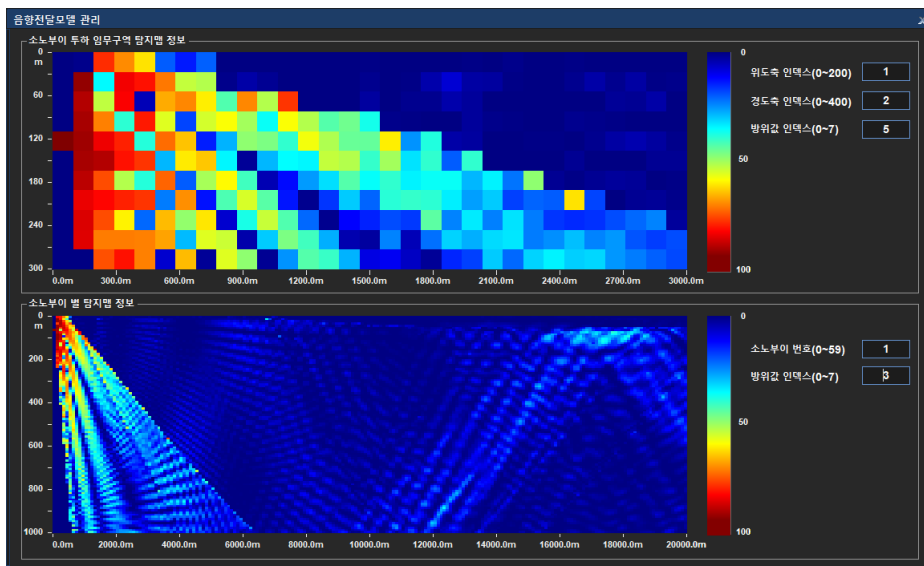


Fig. 9. Detection probability and sonar wave propagation model of deployed sonobuoy

$$SE = SL - TL - (NL - DI) - DT \quad (10)$$

식 (10)에서 SE, SL, TL, NL, DI, DT는 각각 신호초과, 표적 소음 준위, 전달손실, 주변 소음 준위, 지향지수, 탐지 문턱을 나타낸다. 음파 전달 손실(TL)은 3.3 장에서 설명한 BELLHOP 알고리즘을 적용하여 계산하였다. 식 (10)을 통해 도출되는 신호초과에 확률 분포함수를 이용하여 식 (11)과 같이 탐지 확률을 도출할 수 있다^[1].

$$P_d(SE) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{SE} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (11)$$

식 (11)에서 σ 는 신호 초과에 대한 표준편차를 의미하고 있다. 해당 결과를 이용하여 본 연구의 시뮬레이터에서는 투하된 위치의 8방위에서 거리에 따른 탐지확률을 제공한다. 이를 시뮬레이션에 적용하여 Fig. 9의 형태로 확인할 수 있다.

3.5 소노부이 투하 패턴 생성

잠수함 추정 경로를 생성할 때는, 발견 위치로부터 잠수함 경로를 생성한다. GPS 센서 오차, 해류, 경로 추종 오류 등에 대한 사항으로 잠수함이 예상경로에서 틀어지는 현상이 발생한다. 우리는 이를 존재확률이라고 정의하고 존재확률은 예상경로를 중심으로 정규분포를 그린다고 가정했다. 즉, 시간이 지날수록 예상경로 위치에 잠수함이 존재할 확률은 점점 줄어든다 그 주변에 있을 확률은 증가한다.

또한 투하 위치, 심도, 지형에 따라 잠수함 탐지확률이 달라진다. 이를 고려하기 위해서 각 투하 위치에 따른 탐지확률을 미리 계산하여 투하하였을 때, 탐지할 수 있는 확률을 계산하여 가장 높은 값을 가지는 위치로 투하한다. 단 한 개의 경로에 투하할 수 있는 소노부이 개수의 범위를 설정하여 전체 경로에 소노부이를 투하하도록 한다.

4. 시뮬레이션 시나리오 설정 및 결과

4.1 해양환경 데이터 적용

해양 데이터는 잠수함 경로 추정 및 소노부이 투하 패턴에 공통적으로 이용한다. 시뮬레이터는 수집된 데이터를 이용하여 잠수함이 이동하는 환경의 소음 설

정, 투하패턴 영역 설정, 수심에 따른 염도, 수온, 음속을 시뮬레이터에 적용했고 사용자가 데이터를 바꿀 수 있다.

해양환경에 대한 영향을 배경소음, 해상상태, 해상교통, 강우 저주파로 5개로 구분하였고 이를 프리셋으로 설정하여 Fig. 10과 같이 값을 바꿀 수 있게 설정하였다.

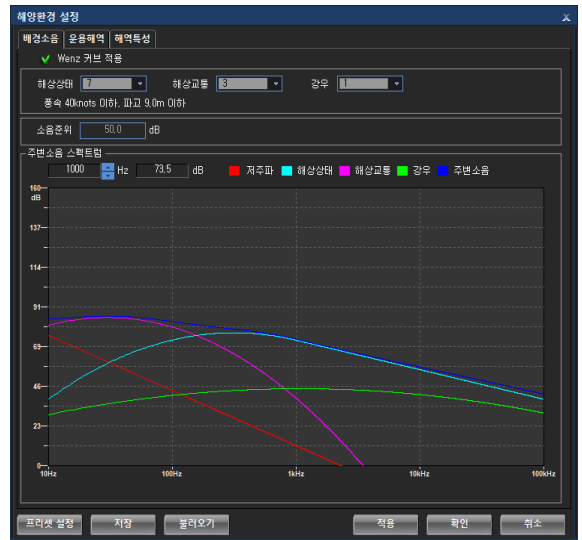


Fig. 10. Background noise setting in simulator

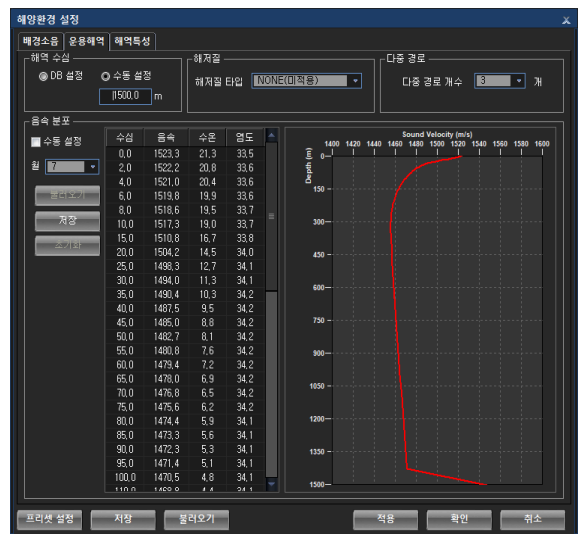


Fig. 11. Water temperature, salinity, speed of sound according to depth of ocean

배경소음뿐만 아니라 수심, 계절에 따라 염도, 수온, 음속이 달라지는 것과 해저질의 타입을 DB에서 불러오거나 사용자가 임의로 설정할 수 있는 수동모드도 구현하였다. 잠수함의 경로를 이동하거나 소노부이를 투하할 때, 모든 영역에서 수행할 수 없어 특정 임무 구역을 설정하여 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 했다. Fig. 11, 12에서 수심, 수온, 염도에 따른 수온 변화, 임무 구역에 대한 설정 및 확인할 수 있다.

4.2 잠수함 경로 추정 시나리오 설정

잠수함 경로는 충돌위험, 위협탐지 위험, 에너지 소비량, 기타 요소들을 고려해야한다. 충돌위험으로는 지형적 요소 외에 장애물 요소가 있고 탐지위험 요소로는 수상함, 잠수함, 음향 탐지 센서가 있다. 이러한 요소들은 인지 여부에 대한 요소를 추가했다. 또한 에너지 소비량에서 초기 잠수함의 연료, 배터리를 설정도 시뮬레이터에서 가능하다. 이후 잠수함이 원하는



Fig. 12. Creating path of submarine, Sonobuoy deployment setting

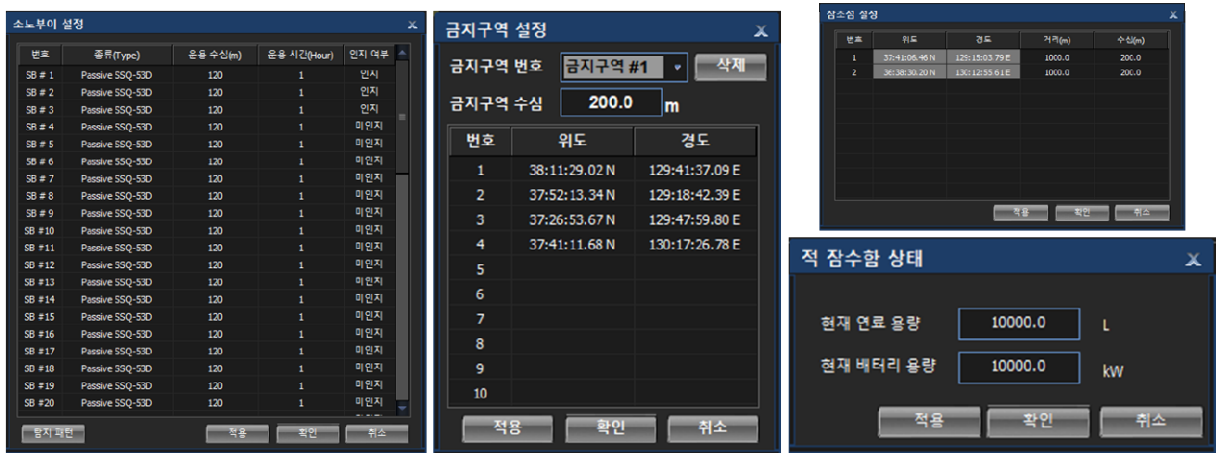


Fig. 13. When planning path, location of sonobuoy and reference point, recognition, prohibited zone, battery of submarine, initial fuel amount setting

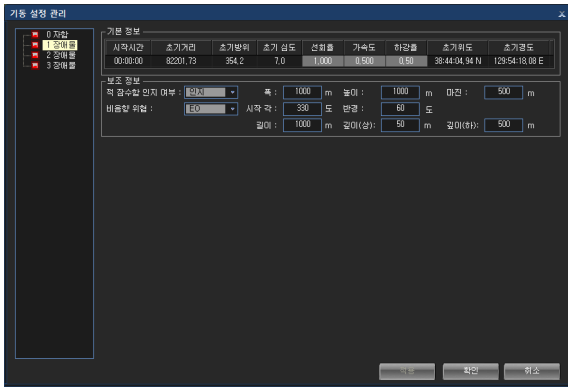


Fig. 14. Obstacle size and location setting



Fig. 15. Route of surface ship and submarine, submarine size, recognition setting in mission area

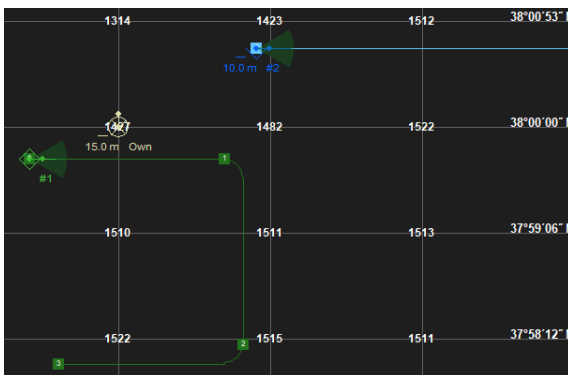


Fig. 16. Path creation result for surface ship and submarine according to setting (Green line : path of surface ship, blue line : path of submarine)

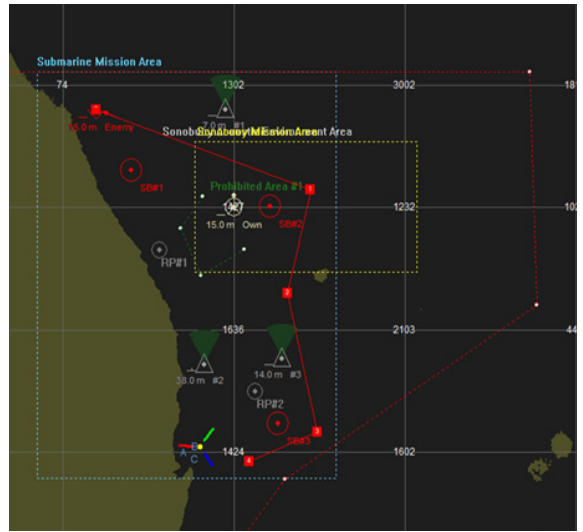


Fig. 17. Preparation screen marine environment and way point that affects path estimation

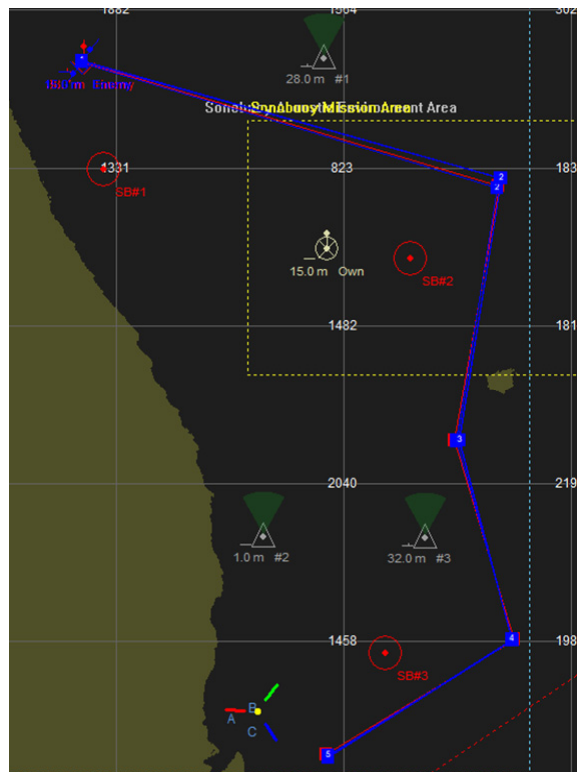


Fig. 18. The scenario result of creating submarine path (Red line : initial target path, Blue line: Simulation result path)

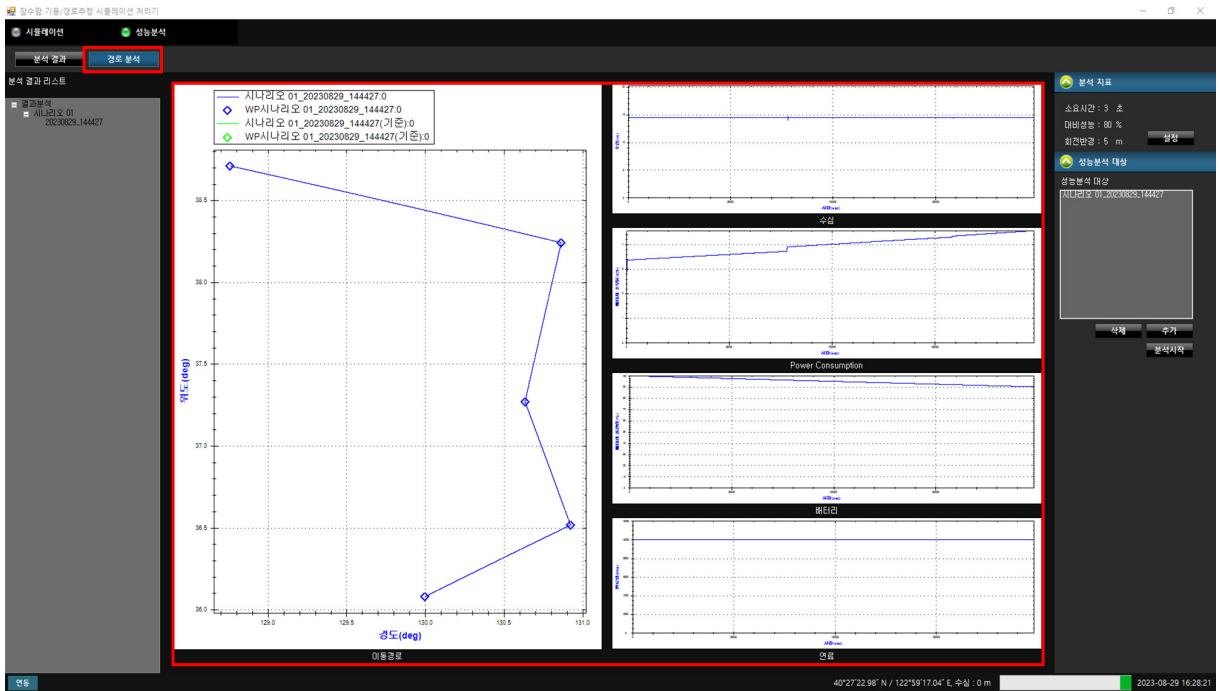


Fig. 19. When moving by the path, fuel and battery usage and path result

경로로 이동하면서 최종 이동 경로, 경로에 따른 연료, 배터리 사용량도 시뮬레이터에서 확인할 수 있다. 이에 대한 설정은 Fig. 13-16에서 확인할 수 있다. 이후 잠수함이 이동하는 경로점을 결정하여 움직이는 것은 Fig. 17에서 확인할 수 있다.

경로 추정에 필요한 환경 및 이동해야하는 경로점을 설정한 이후 시뮬레이션의 동작을 확인하기 위해 별도의 경로 추정 알고리즘을 실행시켰고 그 결과는 Fig. 18에서 확인할 수 있다.

Fig. 18을 보면 원래 이동할 경로가 빨간색으로 나타나고 있는데 해양환경, 장애물, 소노켈 등의 요소를 고려하였을 때, 파란색 선의 경로로 이동하는 것으로 판단된다. 시뮬레이터에서 잠수함이 해당 경로를 이동할 때, 사용하는 연료, 배터리, 경로를 Fig 19과 같이 확인할 수 있게 하였다.

4.3 소노부이 투하 시나리오 설정

3장에서 설정한 환경은 이미 시뮬레이터에 반영이 되어 있어 사용자는 예상 이동경로 5개, 실제 잠수함 이동경로를 설정한다. 설정된 경로에서 사용자가 원하는 투하패턴을 선택하면 최적의 투하패턴을 출력

한다.

잠수함이 이동할 수 있는 예상 경로를 5개를 사용자가 설정할 때, 사용자는 잠수함의 출발 위치 지나가는 경로점, 최종 목적지를 임의로 정할 수 있다. 잠수함의 예상 이동 경로에서는 출발점, 작전영역 in/out 시간, 목적지가 다르게 설정할 수 있다. 예상과 달리 실제 잠수함이 이동하는 경로는 다를 수 있다. 이를 설정하는 방법은 예상 이동 경로 설정 방법과 동일하다. 실제 이동 경로는 잠수함 추적에서 사용할 수 있는 데이터다. 예를 들어 잠수함이 스노켈을 수행하다 발각되었을 때는 잠수함의 위치를 알고 있는 상태로 탐색의 패턴이 아닌 추적 패턴을 생성한다. 본 연구에서는 탐색 기능만 제공한다.

Fig. 20은 잠수함 예상 이동경로 및 실제 이동경로를 설정하는 그림이다. 예상 이동 경로가 설정하고 나서 사용자는 잠수함 투하패턴을 크게 교리 기반, 최적화 기반, 학습 기반, 교리+최적화 기반, 교리-학습 기반, 최적화-학습 기반으로 7가지 모드를 제공한다. 시뮬레이터는 7가지 모드를 제공하나 본 연구에서는 최적화 투하 패턴만 이용하여 최적화된 소노부이 투하 패턴을 생성할 수 있다. Fig. 21은 소노부이 투하 패

턴을 설정하는 그림이다. 현재는 시뮬레이터에서 모드 선택의 데이터만 이용하여 투하 패턴을 생성하지만 추후 경로추적 우선순위, 투하할 때, 최소 탐지확률, PRD 등의 값을 이용하여 최적화 및 학습기반의 조건으로 사용할 예정이다.

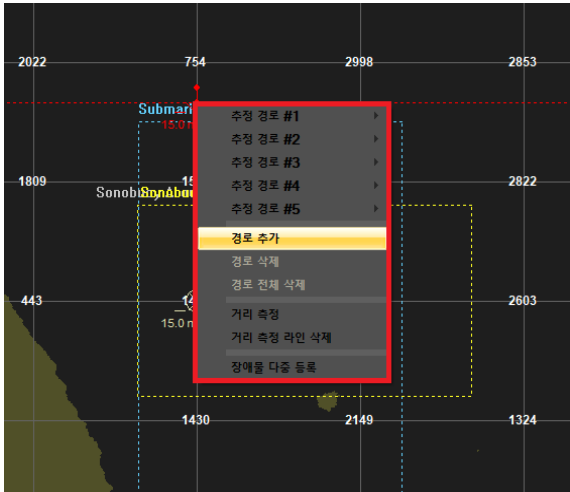


Fig. 20. Estimation path of submarine and real path setting



Fig. 21. Sonobuoy deployment setting

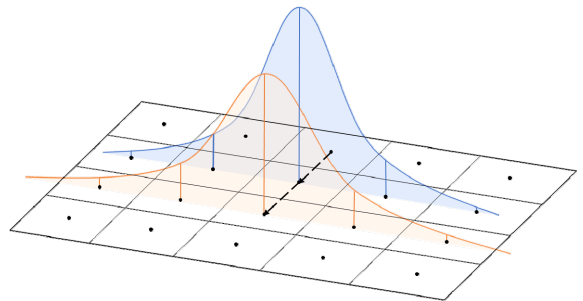


Fig. 22. Probability of existence according to time

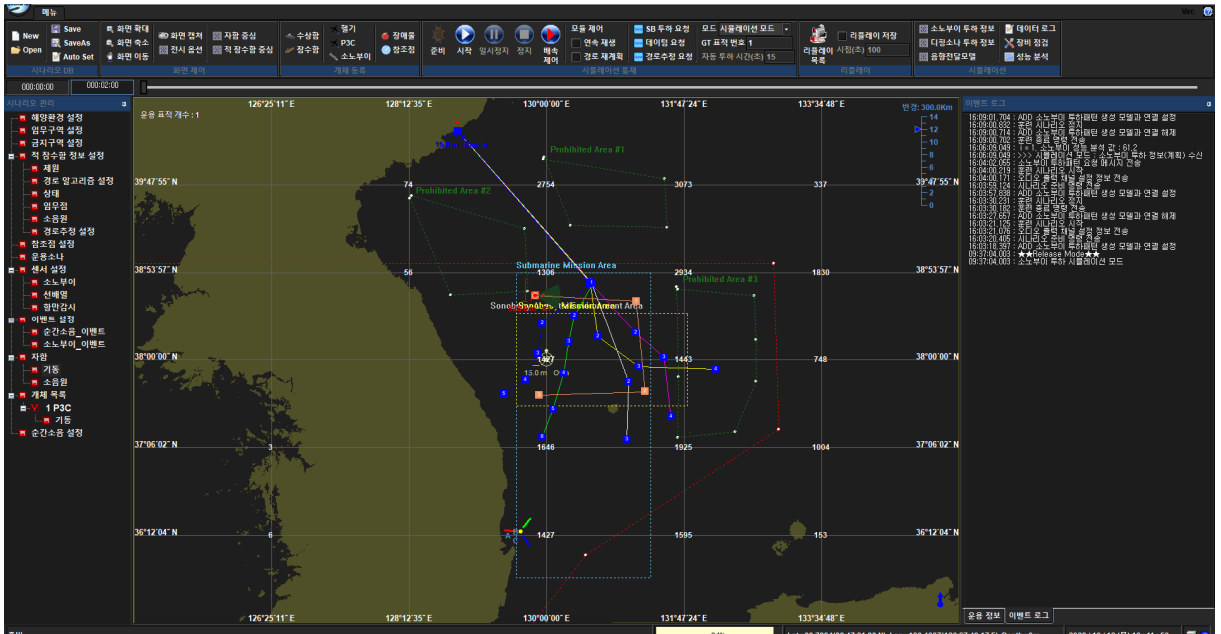


Fig. 23. Estimation path of submarine



Fig. 24. Sonobuoy deployment according to optimization

Fig. 23에서 예상 이동 경로는 서로 다른 시간과 목적지를 가지고 작전구역을 지나간다. 잠수함의 최적화 투하패턴을 Fig. 24에서 확인할 수 있다. Fig. 24에서 각 경로 방향과 같은 방향으로 작전영역 상단에 주로 투하된 것을 확인할 수 있다. 이는 잠수함이 위에서 아래로 가는 경로이므로 아래쪽으로 갈수록 도착하는 시간이 더 느려 Fig. 22와 같이 하단으로 갈수록 존재 확률이 분포의 중심의 존재 확률은 감소하고 점점 옆으로 퍼지는 형태를 가지기 때문이다. 예상 이동 경로를 중심으로 존재확률이 정규 분포를 이루면서 낮아지기 때문에 예상경로 중심에 소노부이를 투하한다. 또한 예상 이동 경로의 존재확률이 있는 영역이 겹치는 경우에는 존재확률이 더해지면서 겹친 구역 위주로 소노부이를 투하하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 잠수함의 이동 경로를 예상하고 소노부이 최적화 투하 패턴을 생성하기 위한 시뮬레이터를 개발하였다. 이를 위해 잠수함 이동 경로 추정, 소노부이 최적화 투하 패턴 생성을 위한 시나리오 설정,

데이터 수집 및 모델링을 수행하였다. 시뮬레이터에서 잠수함의 이동 경로 예측 및 소노부이 투하 패턴을 현실과 유사한 환경에서 제공할 수 있고 이를 이용하여 알고리즘을 개발하는 데 사용할 수 있다.

해당 시뮬레이터는 국방과학연구소에서 잠수함 예상 경로 알고리즘 생성, 소노부이 투하 패턴 생성 최적화 알고리즘 생성하는 데 사용되었다. 또한 시뮬레이션 결과를 이용해서 알고리즘의 성능 분석을 수행할 수 있어 작 잠수함 탐색 작전을 위한 작전 분석 환경으로도 활용될 수 있다.

후 기

본 논문은 2023년도 정부의 재원으로 수행된 연구 과제 결과 중 일부임.

References

[1] Ferla, C., and Michael B. Porter, "Receiver depth selection for passive sonar systems," IEEE Journal

- of Oceanic Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 267-278, 1991.
- [2] Kim, Y., You, H. S., Kim, S. H., & Ji, J. K., "A Study on the Torpedo Sonar Simulation for Combat System by Modeling Target and Noise," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 23, No. 6, pp. 554-564, 2020.
- [3] Jung, Y. C., Kim, B. U., & An, S. K., "An algorithm for submarine passive sonar simulator," The Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 32, No 6, pp. 472-483, 2013.
- [4] Choi, C. M., "A Study on Non-acoustic Stealth Techniques of Submarine," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 1330-1334, 2012.
- [5] Kim, Y. G., Kim, D. J., Yun, K., Lee, Y. Y. and Jeong, S. W., "Prediction of maneuver ability of submarine by captive model test," Proceedings of the Annual Autumn Conference of the Society of Naval Architects of Korea, 2021.
- [6] Abkowitz, Martin A., "Stability and Motion Control of Ocean Vehicles," The MIT Press, Cambridge, 1969.
- [7] Børhaug, E., Pavlov, A., and Pettersen, K. Y., "Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents," In Proc. of the 47th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 4984-4991, 2008.
- [8] Dogrul, Ali, "Numerical prediction of scale effects on the propulsion performance of Joubert BB2 submarine," Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike, Vol. 73, No. 2, pp. 17-42, 2022.
- [9] Etter. P. C., "Underwater Acoustic Modeling and Simulation," CRC Press, 2018.
- [10] Wang, L. S., Heaney, K. E. V. I. N., Pangerc, T. A. N. J. A., Theobald, P. E. T. E., Robinson, S. P., & Ainslie, M. I. C. H. A. E. L., "Review of underwater acoustic propagation models," 2014.
- [11] Jung, Y. C., Lee, K., Seong, W., & Kim, H. R., "Development of range-dependent ray model for sonar simulator," The Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 33, No. 3, pp. 163-173, 2014.
- [12] Urick, Robert J., Principles of Underwater Sound, 3rd Edition, McGraw-Hill, 1983.
- [13] Porter, Michael B, "The bellhop manual and user's guide: Preliminary draft," Heat, Light, and Sound Research, Inc., La Jolla, CA, USA, Tech. Rep 260, 2011.
- [14] Dong, Lei, Hefeng Dong, and J. Hovem., "Bellhop-A modeling approach to Sound propagation in the ocean," Submitted to Proceedings for the 37th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics, 2014.
- [15] Lekkas, Anastasios M., and Thor I. Fossen, "Integral LOS path following for curved paths based on a monotone cubic Hermite spline parametrization," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 22, No. 6, pp. 2287-2301, 2014.
- [16] Catmull, Edwin, and Raphael Rom, "A class of local interpolating splines," Computer aided geometric design. academic Press, pp. 317-326, 1974.
- [17] Global gridded physical profile data from the U.S. Navy's Generalized Digital Environmental Model (GDEM) product database(NODC Accession 9600094).
- [18] NOAA National Centers for Environmental Information, "ETOPO 2022 15 arc-second global relief model," 2022.
- [19] HYbrid Coordinate Ocean Model(2023), GOFS 3.1: 41-layer HYCOM + NCODA Global 1/12° Analysis [dataset], <https://www.hycom.org/>