

측면주사소나 특성에 따른 자율무인잠수정 기뢰탐색 효과도 분석

유태석^{1*} · 박석준¹ · 윤선일² · 박호규¹

Analysis of the Effectiveness of Autonomous Unmanned Underwater Vehicle Mine Search Operation by Side Scan Sonar Characteristics

Tae-Suk Yoo^{1*} · Seok-Joon Park¹ · Seon-Il Yoon² · Ho-Gyu Park¹

^{1*}Research Engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1 Co., Ltd, Seongnam, 13488 Korea

²Chief Research Engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1 Co., Ltd, Seongnam, 13488 Korea

요 약

부설된 기뢰를 소해하기 위해 기뢰매설 예상구역에 대한 탐색을 수행한다. 이 때 기뢰탐색은 기뢰의 위험성, 아군의 안정성 등을 고려하여 자율무인잠수정을 이용한다. 매설된 기뢰를 식별하기 위한 소나시스템은 측면주사소나, 합성 개구소나 등을 탑재한다. 본 논문은 측면주사소나 특성에 따른 기뢰탐색효과도 분석에 대해 기술한다. 각 측면주사소나의 특성을 바탕으로 음향조사역 및 인식확률을 모델링 하였고, AUV의 주행패턴에 따라 분석을 수행하였다. AUV의 주행패턴은 측면주사소나 음영구역의 유무에 따라 3가지 탐색패턴을 정의하였다. 분석결과는 각 탐색패턴마다 탐지시간, 탐지확률을 도출하고 최종적으로 측면주사소나 음영구역의 유무에 따른 탐색 향상도를 도출하였다.

ABSTRACT

In order to Mine Countermeasure (MCM), the search is carried out for the expected mine zone. At this time, mine hunting uses Autonomous Unmanned Vehicle(AUV), taking into account the danger of mine and the stability of our forces. Sonar system for identifying buried mines are equipped with Side Scan Sonar(SSS) or Synthetic Aperture Sonar(SAS). This paper describes the analysis of mine hunting effects according to the commercial SSS characteristics. Based on the characteristics of each SSS, the insonified area and recognition probability were modeled, and the analysis was performed according to the search pattern of the AUV. AUV's search pattern defines three patterns depending on the presence or absence of SSS or shaded areas. The analysis results derived search time and detection probability for each search pattern, and finally, the improvement of search depending on the presence or absence of side injection or shaded area.

키워드 : 측면주사소나, 자율무인잠수정, 기뢰탐색, 탐색시간, 탐지확률

Keywords : Side Scan Sonar, Autonomous Unmanned Vehicle, Mine hunting, Search time, Detection probability

Received 25 June 2020, Revised 26 June 2020, Accepted 1 July 2020

* Corresponding Author Tae-Suk Yoo(E-mail:taesuk.yoo@lignex1.com, Tel:+82-31-8026-4309)

Research Engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1 Co., Ltd, Seongnam, 13488 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.8.1077>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

기뢰(Mine)는 일반적인 수중유도무기처럼 표적을 추적하지 않고 적이 기뢰에 접근할 때까지 기다리는 무기 체계이다. 종류에 따라 상이하지만 한번 부설된 기뢰는 은밀성으로 인하여 위치확인이 어렵다. 이런 특성으로 인하여 부설에 비해 소해에 훨씬 많은 시간과 노력이 요구되며 또한 위험이 동반되는 전형적인 비대칭 무기체계이다.[1-2]

부설된 기뢰를 소해하는 대기뢰전(MCM : Mine Countermeasure)을 수행하기 위해 기뢰매설 예상구역에 대한 탐색을 수행한다. 이 때 기뢰탐색은 기뢰의 위험성, 아군의 안정성 등을 고려하여 자율무인잠수정(AUV : Autonomous Unmanned Underwater Vehicle)을 이용한다.[3]

AUV를 이용한 기뢰탐색을 수행하기 위해서 중요한 항목 중 하나는 탐색시간이며, 효율적인 탐색을 위해서는 여러 가지 조건이 요구된다. 첫 번째로 AUV의 항법 성능이 요구된다. 수중환경에서는 위성항법장치(GPS : Global Positioning System)의 신호를 수신하지 못하기 때문에 관성항법장치(INS : Inertial Navigation System), 도플러속도계(DVL : Doppler Velocity Log) 등을 이용한 복합항법 기법이 주로 사용된다. 또한 주기적으로 부상하여 GPS 신호를 수신 후 위치보정을 하고 다시 정해진 패턴에 따라 탐색을 수행한다. 두 번째로 전지 성능이 요구된다. 전지는 추진체와 기타 전자 장비의 운용전력을 바탕으로 운용 요구시간에 맞게 용량이 선정되며 대부분 2차 전지로 용량에 맞게 개발된다. 세 번째로 기뢰탐색에 대한 소나 탑재센서 분야이다. AUV의 크기, 비용 등의 조건에 따라 탐색을 위하여 측면주사소나(SSS : Side Scan Sonar), 합성개구면소나(SAS : Synthetic Aperture Sonar) 등이 탑재된다. 측면주사소나는 종류에 따라 싱글/멀티빔 측면주사소나로 구분이 되며 사용주파수, 운용가능 수심에 따라 매우 다양한 제품이 사용되고 있다. 측면주사소나는 수중에서 수 cm부터 수백 m 크기의 물체까지 식별할 수 있으며, 넓은 탐색범위를 짧은 시간 내에 효과적으로 조사할 수 있는 센서이다. SAS는 수중의 물체를 원거리에서도 고해상도의 영상을 얻을 수 있는 센서이다. 항공기의 SAR처럼 이동하면서 동일한 지점을 반복적으로 탐색하면 개구면이 커져서 작은 물체에 대한 고해상도 영상을 얻을 수 있다. 측면주

사소나에 비하여 고해상도의 영상을 획득할 수 있지만 상대적으로 높은 가격, 전력소모 등이 소요된다.[4]

본 논문에서는 소나 센서 특성에 따른 무인잠수정 기뢰효과도 분석을 수행한다. 효과도 분석은 크게 탐색시간, 기뢰탐색확률 2가지 항목으로 설정하여 분석한다. 센서 특성에 따른 효과도를 산출하기 위하여 항법오차, 배터리 성능은 고려하지 않는다. 먼저 상용화된 다양한 측면주사소나의 데이터베이스를 구축한 후 각각의 탐색가능범위를 산출한다. AUV에 장착이 가능한 상용 측면주사소나 8종에 대한 센서 성능을 토대로 단일빔에 대한 음향조사역(Insonified Area)을 모델링하였다.[5-9] 이 때, 측면주사소나는 소나 특성 상 좌우 탐색영역 중간부분에 음영구역이 존재한다. 분석에 필요한 AUV의 운동모델은 상용화된 REMUS의 모델을 참조하였으며 경로점 유도 및 자세제어기를 설계하였다. 전체 AUV의 탐색범위를 세팅하면 측면주사소나의 탐색가능범위에 따라 경로점을 자동 생성한다. 탐색패턴은 M자형, W자형, 장방형, 4자형, 정방형 등이 있으며 이중 장방형 탐색패턴이 가장 확률이 뛰어나다는 연구결과에 따라 장방형('ㄷ') 패턴으로 생성하였다.[10] 탐색패턴에 따른 경로점을 생성하기 위해 총 3가지의 분석방법을 정의 후 시뮬레이션을 수행하였다. 3가지 분석방법의 가장 큰 차이점은 측면주사소나 센서의 음영구역 유무이다. 먼저 각 분석방법에 따른 탐색시간에 대한 단일 시뮬레이션을 수행한다. 탐지확률 계산을 위하여 SSS의 음향조사역 산출결과 기반으로 빔의 강도에 따라 음향 조사역을 정규화하여 SSS가 임의의 물체를 인식할 확률을 모델링하였다. 기뢰탐지확률은 전체 탐색범위 내에 시뮬레이션 반복 수행(100회)마다 랜덤으로 10개의 기뢰를 배치한 후 AUV의 주행에 따른 탐지 확률을 계산한다. 최종적으로 분석이 완료된 탐지확률을 바탕으로 분석방법에 따른 탐지효율을 도출하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 운동모델

본 논문에서는 학술적으로 공개되어 있는 REMUS의 유체역학적 특성을 활용하여 운동모델을 개발하였다. 무인잠수정의 운동 모델은 식 (1)-(6)과 같이 6자유도 운동방정식을 사용하여 유도하였다.

$$m(\dot{u} + z_C \dot{q}) = X_H + X_S + X_P + X_\delta \quad (1)$$

$$m(\dot{v} + ur - z_C \dot{p} + x_C \dot{r}) = Y_H + Y_S + Y_\delta \quad (2)$$

$$m(\dot{w} - uq - x_C \dot{q}) = Z_H + Z_S + Z_\delta \quad (3)$$

$$I_x \dot{p} - mz_C(\dot{v} + ur) = K_H + K_S + K_P + K_\delta \quad (4)$$

$$I_y \dot{q} + mz_C \dot{u} - mx_C(\dot{w} - uq) = M_H + M_S + M_\delta \quad (5)$$

$$I_z \dot{r} + mx_C(\dot{v} + ur) = N_H + N_S + N_\delta \quad (6)$$

여기서 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ 는 선형 가속도, u, v, w 는 속도, p, q, r 은 회전각속도, m 은 질량, X, Y, Z 과 K, L, N 은 각각 3축에 대한 병진운동 및 회전운동에 대한 외력을 나타낸다. H 항은 동유체역, S 항은 중력 및 정유체력, P 항은 추력 및 토크, δ 항은 핀 제어력을 각각 나타낸다.

본 논문에 사용된 소형 무인 잠수정의 특성을 고려하여 선형화된 종축(7)과 횡축(8)에 대한 모델은 각각 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.9444 & 0.5574 & 0 & 0.0170 \\ 3.9038 & -0.9535 & 0 & -0.6967 \\ 1 & 0 & 0 & -1.2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.5455 \\ -4.0268 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_e \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -17.3210 & -1.5217 & 0 \\ -7.8508 & -11.9241 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.1519 \\ -1.0273 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (8)$$

종축의 상태변수는 w, q, z, θ 이며 제어 입력은 δ_e , 횡축의 상태변수는 v, r, ψ 이며 제어입력은 δ_r 이다. 이 때, 종축/횡축 각각 (A, B) 는 제어가능(controllable)하다.

2.2. 유도 및 자세 제어기 설계

자세제어기는 상태 되먹임 기법(state feedback) 설계 기법을 이용하여 설계하였다. 다음과 같은 시스템이 주어졌을 때,

$$\dot{x} = (A - BK)x + BFr \quad (9)$$

$$y = Cx \quad (10)$$

$$u = -Kx + Fr \quad (11)$$

x 는 N 차원의 상태변수, u 는 m 차원의 제어입력이며 A, B 는 각각 시스템 행렬 및 입력 행렬이다. 그리고, K 는

되먹임 이득행렬, r 은 reference 입력값, F 는 r 에 대한 이득행렬을 나타내며 그림 1은 제어기의 구조를 나타낸다.

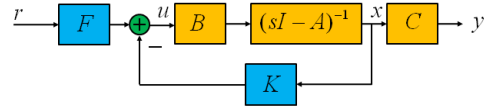


Fig. 1 Structure of Attitude Controller

자세 제어기를 설계한 후, 경로점(Waypoint) 제어를 수행하였다. 이 때, xy 축 제어입력은 요각(ψ)을 이용하였으며 이는 그림 2와 같이 정의된다.

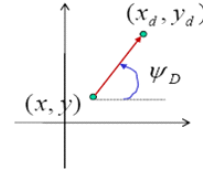


Fig. 2 Yaw angle command

$$\psi_e = \psi_D - \psi, \quad \dot{\psi}_D = 0 \quad (12)$$

$$\psi_D = \text{atan2}(y_d - y, x_d - x) \quad (13)$$

이 때, ψ_D 는 원하는 요각, ψ_e 는 원하는 요각과 현재 요각의 차이값이다. z 축 제어 입력은 깊이(z)를 이용하였으며 이는 다음과 같이 정의 된다.

$$z_e = z_D - z, \quad \dot{z}_D = 0 \quad (14)$$

이 때, z_D 는 원하는 깊이, z_e 는 원하는 깊이와 현재 깊이의 차이값이다. 경로점은 측면주사소나의 최대탐색 거리를 기준으로 탐색영역내에서 자동으로 생성하였으며, 목표지점과의 거리가 10m 이내가 되면 경로점을 변경하도록 설정하였다.

2.3. 소나모델

2.3.1. 측면주사소나 음향조사역 모델

기뢰 탐지를 수행하는 음탐기는 넓은 범위를 한 번에 탐색할 수 있는 측면 주사 방식으로 한정하고, AUV에 장착이 가능한 상용 측면 주사 음탐기 8종에 대한 센서 성능을 토대로 단일빔에 대한 음향조사역을 모델링하였다. 음향조사역은 AUV가 주행 중 음탐기가 한번의 송, 수신으로 조사 가능한 영역으로, 보통 측면 주사 음탐기 변환자의 수직, 수평 빔폭과 탐지거리(Range)를 기

준으로 산출할 수 있다. 음향 조사역은 그림 3,4와 같이 중앙부분은 좁고 양측면으로 멀어질수록 넓어지는 사다리꼴 모양으로 표현되며, 변환자 장착위치에 따라 음파가 전달되지 않거나 근거리 회절로 영상화가 어려운 사각지대는 음향 조사역에서 제외하였다.

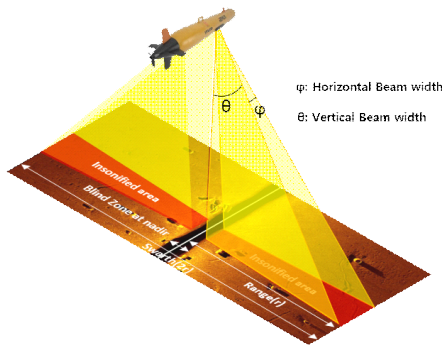


Fig. 3 A Conceptual Diagram of Side Scan Sonar's Insonified Area

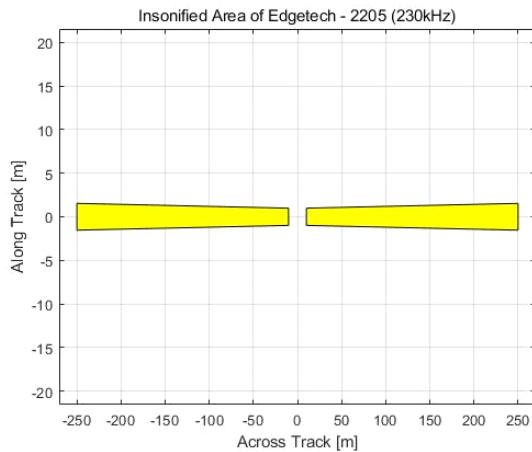


Fig. 4 An Insonified Area of Side Scan Sonar (Edgetech, 2205)

2.3.2. 기뢰탐색 확률 모델

기뢰탐색 효과도 산출을 위해 경로점을 주행하는 AUV가 탐색 영역 내 임의의 지역에 부설된 기뢰를 인식할 수 있는 확률에 대한 모델링을 수행하였다. 우선 상용 측면주사 음탐기 8종에 대한 음향조사역 산출결과 기반으로 빔의 강도에 따라 음향 조사역을 정규화하여 측면주사소나가 임의의 물체를 인식할 확률을 모델

링하였다. 빔의 강도가 높은 지점(Sweet Spot)에 가까울수록 영상화 시 대조도가 높아 물체 인식에 적합하기 때문에 이를 기반으로 음향조사역 내 물체 인식 확률을 아래 그림 5와 같이 산출하였다.

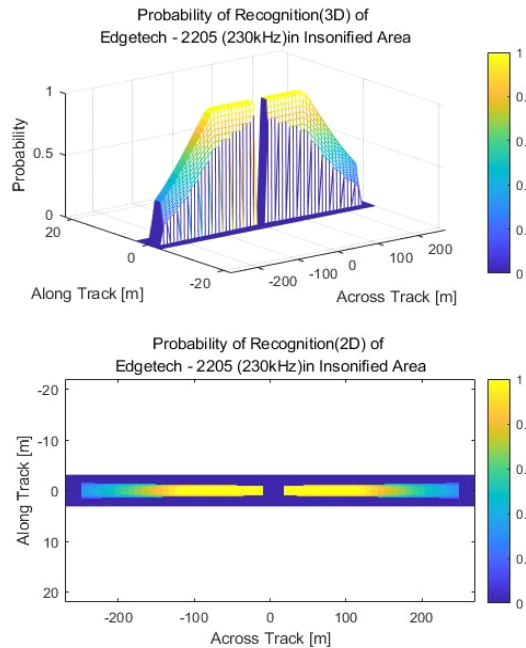








Fig. 5 An Object Recognition Probability of Side Scan Sonar in Insonified Area (Edgetech, 2205)

III. 시뮬레이션

3.1. 시뮬레이션 조건

센서 특성에 따른 무인잠수정 탐색 효과도 분석을 수행하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 측면주사소나는 8가지의 상용제품의 특성을 바탕으로 분석을 수행하였고 주요특성은 표1에 나타나 있다. 또한 각 측면주사소나에 대한 물체인식확률 결과는 그림 6과 같다. 시뮬레이션을 수행하기 위하여 3가지의 분석방법을 정의하였는데 크게 측면주사소나의 음영구역 유무에 따라 분석을 수행하였다. 분석방법 1은 측면주사소나의 음영구역이 존재하는 상황에서 최대탐지거리를 기준으로 경로점을 생성하였다. 분석방법 2와 3은 측면주사소나의 음영구역이 존재하지 않으며 분석방법 2는 음영구역 극복을 위해 센서 추가탐재 또는 심해측

Table. 1 Characteristic of Eight commercial Side Scan Sonar

#	Manufacturer	Model	Image	Frequency(kHz)	AUV velocity(knot)	Max across track(m)
1	ATLAS ELEKTRONIK	Vision 600		800	3	50
2	EdgeTech	2205		850	3	75
3	Marine Sonic Technology	ARC Scout Mk II		900	3	80
4	ATLAS ELEKTRONIK	Vision 600		400	3	100
5	Marine Sonic Technology	ARC Scout Mk II		600	3	140
6	EdgeTech	2205		540	3	150
7	KLEIN	UUV-3500		400	3	200
8	Marine Sonic Technology	ARC Scout Mk II		300	3	250

심이 포함된(bathymetric) 측면주사소나를 사용하였고 가정하였으며 이 때 음영구역에 대한 인식확률은 1로 정의한다. 즉, 분석방법 2는 분석방법 1과 동일한 경로점을 생성하며, 이에 따라 탐색시간은 똑같다. 분석방법 3은 기존 측면주사소나의 음영구역이 존재하기 때문에 이를 극복하고자 측면주사소나의 음향조사역이 겹치도록 경로점을 생성하였다. 분석방법 1, 2, 3에 따라 순차적으로 시뮬레이션을 수행하였으며 순서는 그림 7

과 같다. 먼저 AUV의 탐색구역을 설정하게 되는데 본 논문에서는 1km × 1km 구간으로 설정하였다. 탐색구역 설정 후 분석방법 1,2,3에 따라 경로점을 자동생성한다. 경로점은 정방향(‘ㄷ’) 패턴으로 설정하며, 측면주사소나의 음향조사역 범위에 따라 생성한다. 탐색시간 분석은 단일시뮬레이션으로 결과를 도출하며 8개의 SSS, 3개의 분석방법에 대하여 총 24개의 탐색시간 결과를 분석한다. 그 후 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용하여

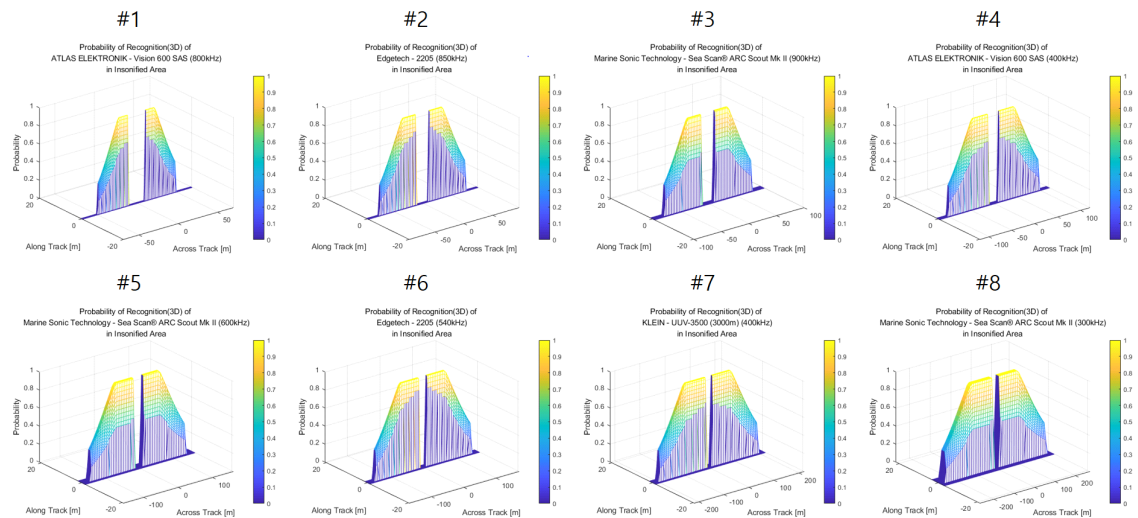


Fig. 6 An Object Recognition Probability of Eight commercial Side Scan Sonar

탐지확률에 대한 분석을 수행한다. 이 때, 탐색구역 내 10개의 기뢰를 시뮬레이션 반복 시 매번 랜덤으로 배치하며, 각 SSS 및 분석방법 종류에 따라 100회씩 반복시뮬레이션을 수행한다. 그림 8은 정해진 경로에 랜덤으로 기뢰가 배치된 예를 나타내고 그림 9는 분석방법 1의 음영구역, 그림 10은 분석방법 3의 음영구역 극복에 대한 예이다. 그림 9와 10에서 사이드스캔소나 표시영역의 간격이 띄어져 있는 이유는 메모리 문제상으로 인위적으로 10초에 한번씩 데이터를 도시하였기 때문이다.

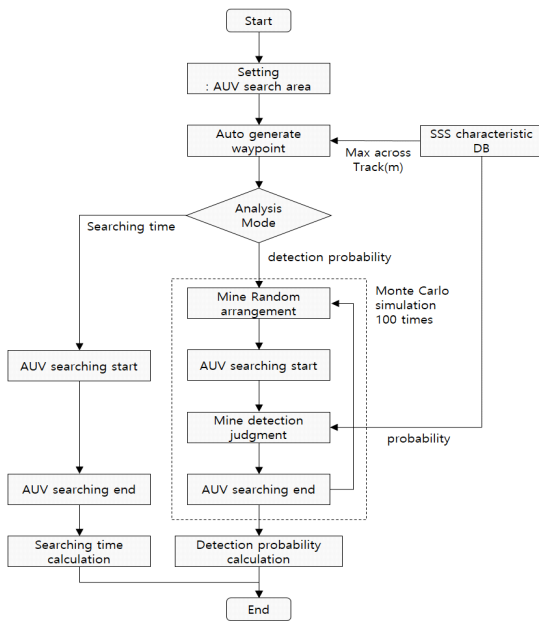


Fig. 7 Simulation structure

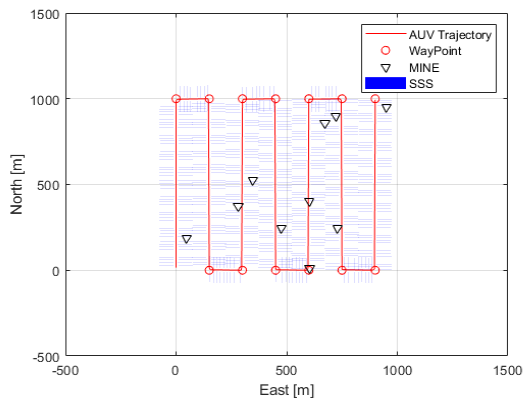


Fig. 8 Example of Mine random setting

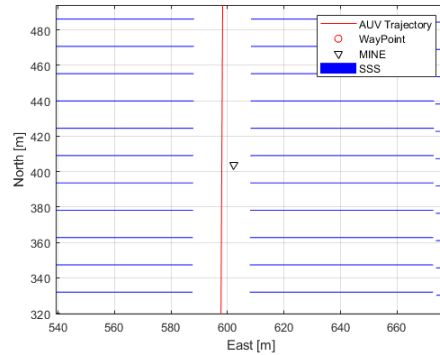


Fig. 9 Example of Analysis method 1 trajectory

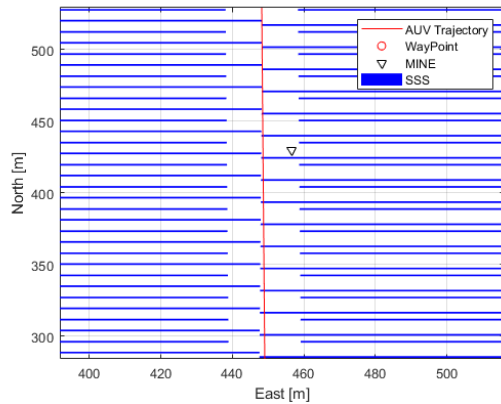


Fig. 10 Example of Analysis method 3 trajectory

3.2. 시뮬레이션 결과

탐색시간에 대한 분석결과는 그림 11과 같다. 먼저 분석방법 1과 분석방법 2는 경로점 개수가 똑같기 때문에 탐색시간은 동일하다. 하지만 분석방법 3은 측면주사소나의 음영구역을 극복하기 위하여 음향조사역이 겹치도록 경로점을 설정하였기 때문에 탐색시간이 증가한다. 탐색시간 분석결과는 탐지확률결과와 체계 운용조건을 고려하여 최종적으로 측면주사소나 모델을 선정하는데 중요한 요소로 사용된다. 그림 12는 탐지확률 분석결과이며 분석방법 1과 분석방법 2의 결과를 비교하였다. 동일한 경로점 및 탐색패턴에서 음영구역을 극복할 수 있는 분석방법 2는 예상대로 분석방법 1보다 기뢰를 탐지할 수 있는 확률이 높은 것으로 나타났다. 그림 13은 기뢰탐지확률에 대한 분석방법 1과 분석방법 3의 비교결과이다. 음영구역을 극복하기 위해 더 많은 경로점을 생성한 분석방법 3은 예상과 달리 모든 구간

Table. 2 Result of simulation

#	Analysis method 1		Analysis method 2		Analysis method 3	
	Search time (min)	Detection probability	Search time (min)	Detection probability	Search time (min)	Detection probability
1	128.93	0.57	128.93	0.75	236.43	0.49
2	84.86	0.68	84.86	0.8	160.91	0.74
3	85.56	0.59	85.56	0.83	149.96	0.65
4	75.26	0.73	75.26	0.82	128.93	0.79
5	52.06	0.74	52.06	0.8	96.51	0.84
6	52.71	0.77	52.71	0.85	84.86	0.86
7	40.86	0.77	40.86	0.8	75.26	0.92
8	43.03	0.81	43.03	0.85	64.5	0.93

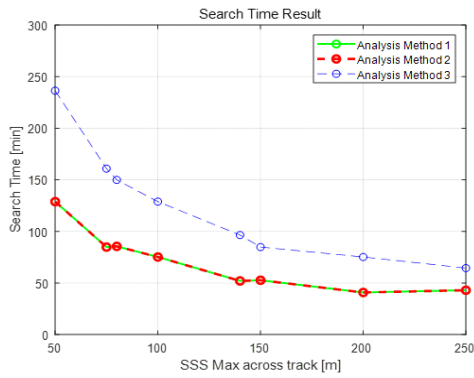


Fig. 11 Analysis result - Search time

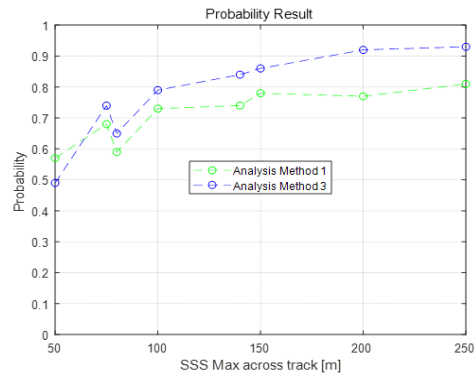


Fig. 13 Analysis result - Probability

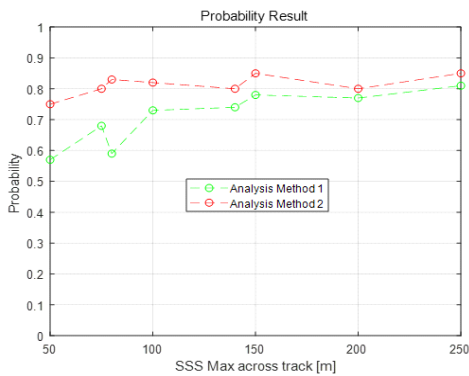


Fig. 12 Analysis result - Probability

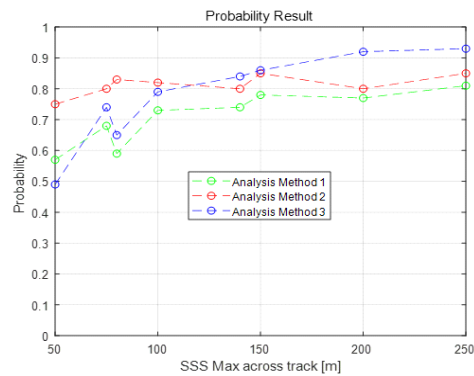


Fig. 14 Analysis result - Probability

에서 분석방법 1보다 탐지확률이 높지는 않았다. 이는 측면주사소나의 음향조사역에 대한 범위에 따라 차이를 보였는데 가장 범위가 작은 1번 측면주사소나의 경우 오히려 분석방법 1보다 탐지 확률이 낮았다. 원인은 그림 6을 보게 되면 음향조사역의 범위에 대비하여 다

른 센서들에 비해 음영구역의 비율이 크기 때문에 궤적을 겹치도록 설정하여도 탐지 못하는 구간이 많아지기 때문이다. 1번 센서를 제외한 나머지 센서들은 분석방법 1에 비해 높은 확률로 기뢰를 탐지하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 14를 통해 분석방법 1,2 그리고 3에 대

한 기뢰탐지확률을 한 눈에 확인할 수 있으며, 이에 대한 수치결과는 표 2에 나타나 있다.

3.3. 종합분석

시뮬레이션 결과를 바탕으로 측면주사소나의 음영구역 유무에 따라 종합 분석을 수행한다. 먼저 분석방법 2의 경우 분석방법 1에 비해 모든 센서 특성에 대하여 기뢰탐지확률이 높은 것으로 확인되었다. 분석방법 3의 경우 1번 센서를 제외하고 분석방법 1에 비해 기뢰탐지확률이 높은 것으로 확인되었다. 이를 통해 분석방법 1에 대한 분석방법 2와 분석방법 3의 탐색 향상도를 도출하였으며 이는 그림 15, 표 3에 나타나 있다. 탐색향상도를 보게 되면 사이드스캔소나의 음향조사역에 따라 분석방법 2와 3의 경향을 확인할 수 있다. 그림 15를 확인하게 되면 1~4번 센서는 분석방법 2의 탐색향상도가 높

았으며 5~8번 센서는 분석방법 3의 탐색향상도가 높은 것을 확인할 수 있다. 특히 음향조사역의 범위가 적을수록 분석방법 2의 향상도가 높게 나타나고 음향조사역의 범위가 높을수록 분석방법 3의 향상도가 높은 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 무인잠수정의 탐색 효과에 주요한 요인을 줄 수 있는 항법, 전지, 기타 장비 등의 효과를 고려하지 않고 측면주사소나의 특성을 바탕으로 분석을 수행하였다. 이에 대하여 분석방법을 3가지로 정의하고 탐색시간, 탐지확률, 그리고 측면주사소나 음영구역의 유무에 따른 탐색향상도를 도출하였다. 특히 음영구역이 없는 분석방법 2와 분석방법 3의 비교결과는 음향조사역의 범위에 따라 상이한 것을 확인할 수 있었다.

향후 무인잠수정의 운용개념, 시나리오 등을 바탕으로 항법, 전지, 기타 장비 등의 성능을 고려하여 시뮬레이션 수행 및 결과를 분석할 예정이다.

Table. 3 probability improvement compare with analysis method 1

#	Probability Improvement	
	Analysis method 2	Analysis method 3
1	24.0 %	-16.3 %
2	15.0 %	8.1 %
3	28.9 %	9.2 %
4	10.9 %	7.5 %
5	7.5 %	11.9 %
6	8.2 %	9.3 %
7	3.7 %	16.3 %
8	4.7 %	12.9 %

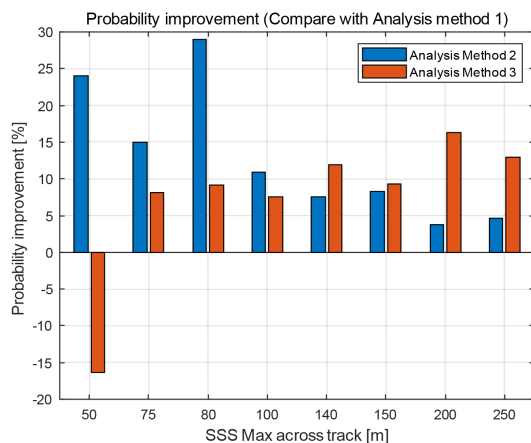


Fig. 15 Analysis result - Probability improvement

REFERENCES

- [1] S. P. Hong, S. I. Yoon, B. W. Choi, and H. S. Oh, "A study for Optimization Methodology of Unmanned System Architecture for Mine Countermeasure Based on Effectiveness," *Society of Korea industrial and System Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 62-69, Jun. 2014.
- [2] A. R. Hwang, M. H. Kim, and S. Y. Lee, "A study of Simulation Model for Effectiveness Analysis Simulation of Unmanned Underwater Vehicle for Mine Searching," *Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 15, no. 4, pp. 410-416, Aug. 2012.
- [3] A. R. Hwang, M. H. Kim, S. Y. Lee, J. M. Yoon, and C. K. Kim, "A Study on Unmanned Underwater Vehicle Operational Performance Analysis for Mine Search Operation," *Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 14, no. 5, pp. 781-787, Oct. 2011.
- [4] J. E. Kye, J. I. Cho, W. P. Yoo, S. L. Choi, and J. H. Park, "Trends and Applications on Multi-beam Side Scan Sonar Sensor Technology," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 28, no. 6, pp. 167-179, Dec. 2013.

- [5] L. Xavier, "Modelling of the sound field radiated by Multibeam Echosounders for Acoustical Impact Assessment," *Applied Acoustics* 101, pp. 202-221, Sep. 2015.
- [6] J. Fransman, J. Sijs, H. Dol, E. Theunissen, and B. De, "Distributed Constraint Optimization for Autonomous Multi AUV Mine Countermeasure," *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*, Charleston, SC, 2018.
- [7] P. Williams, "The New Muesli Complexity Metric for Mine-Hunting Difficulty in Sonar Images," *2018 OCEANS MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans*, Kobe, Japan, 2018.
- [8] C. Rhen, S. Keisala, A. Raberg, A. Lindberg, and P. Abrahamsson, "AUV Seafloor Tracking for MCM Operations," *2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop(AUV)*, Porto, Portugal, 2018.
- [9] A. Crawford, and W. Connors, "Performance Evaluation of a 3-D Sidescan Sonar for Mine Countermeasures," *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*, Charleston, SC, 2018.
- [10] J. I. Moon, "A study for Effective Methodology of the Search Pattern of AUV," M. S. Hannam Univ, 2014.



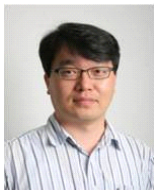
유태석(Tae Suk Yoo)

2010년 세종대학교 항공우주공학과(공학사)
 2012년 세종대학교 항공우주공학과(공학석사)
 2012년 ~ LIG넥스원 해양연구소 선임연구원
 ※ 관심분야 : 관성센서, 관성항법, 수중복합항법



박석준(Seok Joon Park)

2010년 서강대학교 전자공학과(공학사)
 2012년 서강대학교 전자공학과(공학석사)
 2012년 ~ LIG넥스원 해양연구소 선임연구원
 ※ 관심분야 : 디지털 신호처리 시스템, 소나 시스템, 초음파 의료영상 시스템



윤선일(Seon Il Yoon)

1999년 건국대학교 전자공학과(공학사)
 2001년 건국대학교 전자정보통신(공학석사)
 2001년 ~ LIG넥스원 해양연구소 수석연구원
 ※ 관심분야 : 관성항법시스템, 복합항법, 무인잠수정



박호규(Ho Gyu Park)

1987년 명지대학교 전기공학과(공학사)
 1989년 명지대학교 전기공학과(공학석사)
 1992년 ~ LIG넥스원 해양연구소 수석연구원
 ※ 관심분야 : 수중유도무기 체계, 무인잠수정 자율제어기술분야