



Received: 2024/05/28
Revised: 2024/06/07
Accepted: 2024/06/21
Published: 2024/06/30

***Corresponding Author:**

Seungki Yu

Dept. of Battlefield Analysis and Development,
LIG Nex1

333, Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea

Tel: +82-31-5178-4283

E-mail: seungki.you2@lignex1.com

Abstract

본 논문에서는 교전수준의 M&S를 위한 객체단위의 소나 모의 방안을 제시하였으며, 플랫폼에 탑재되어 운용되는 소나의 모의 수준을 정의하였다. 이를 이용하여 교전 중 발생하는 플랫폼의 기동정보와 소나의 탑재 조건을 입력받아 좌표계상에서 변화하는 소나의 탐지 조건을 모의하였다. 또한 소나 운용환경의 시·공간적 변화를 반영하기 위해 계절에 따른 수중 환경 변화와 해저지형의 수심변화를 합성환경 DB를 적용하여 시뮬레이션의 시간 진행에 따른 탐지효과를 분석하였다.

This paper studies object based sonar simulation theory to develop an engagement level M&S system. This sonar model used sonar loading conditions and the platform's maneuvering information that change on the coordinate system. In addition, this model used a synthetic environment DB for temporal and spatial changes environments in the sonar operating condition. Temporal and spatial composition refers to seasonal factors (temperature, salinity) and changes in the seafloor topography. The simulation results show the change in detection probability that occurs during engagement as the simulation time progresses.

Keywords

소나 모델(Sonar Model),
교전급 모의(Engagement Level Simulation),
플랫폼 고정 센서(Platform Fixed Sensor),
해군 교전(Naval Engagement)

교전 수준의 플랫폼 고정 능동소나 모의방안 연구

Research on Method for Developing a Platform Fixed Active Sonar Model for Engagement Level Simulation

유승기^{1*}, 정동민², 김창환¹, 장재덕¹, 최태영³

¹LIG넥스원 전장분석개발팀 수석연구원

²LIG넥스원 전장분석개발팀 선임연구원

³해군 대위/전술분석시험평가단 전투실험과 수중/항공실험 담당

Seungki Yu^{1*}, Dongmin Jeong², Changhwan Kim¹, Jea-deok Jang¹, Taeyoung Choi³

¹Principal researcher, Dept. of Battlefield Analysis and Development, LIGNex1

²Senior researcher, Dept. of Battlefield Analysis and Development, LIGNex1

³LT, ROK Navy/Underwater and Aerial Combat Experimentation Officer, Warfighting Experiment Section, Naval Force Analysis, Test & Evaluation Group

1. 서론

국방 M&S 모델은 국방기획관리상의 소요제기, 획득관리 및 분석평가는 물론 군의 훈련까지 과학적으로 지원하는 도구 및 수단을 총칭하는 개념이다. 이는 전쟁 또는 전투요소들의 영향을 연구하기 위해 실전과 유사한 가상 전투상황을 조성해 주고, 전투요소 등의 효과를 측정 및 평가해 준다.

국방 M&S 모델은 Fig. 1과 같이 계층에 따라 표현의 범위와 묘사 수준이 구분되는데, 일반적으로 교전(engagement)급 모델은 제한된 시나리오에서 1대1, 1대 n 또는 n 대 n 의 교전에서 체계들을 표현하여 개별 플랫폼의 효과와 특정 표적 또는 적 위협체계에 대한 플랫폼 무기의 효과를 평가한다. 이러한 계층별 M&S를 목적에 맞게 구현하기 위해서는 모델의 충실도와 해상도가 사전에 정의되어야 한다.

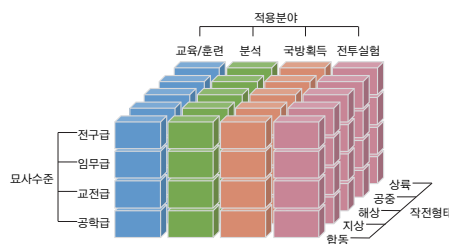


Fig. 1. M&S 분류

M&S 영역에서 충실도는 묘사하고자 하는 실제 체계와 비교하여 모델이 갖는 표현의 정확도를 의미하며, 해상도는 실제 체계를 표현하는 데 있어서 상세하거나 치밀한 정도를 의미한다. 일반적으로 해상도가 높을수록 정확도가 높아질 것으로 예상하지만, 해상도가 높은 모델은 입력 요인에 따른 민감도가 높아짐에 따라 정확도가 낮아질 수 있다. 또한 해상도가 높은 모델일수록 표현의 상세도는 높아지지만, 연산량이 증가하여 분석에 제한요인을 가져올 수 있다. 따라서 해군의 교전급 모의에서는 플랫폼 단위의 분석이 가능할 수 있도록 모델링되어야 하며, 대잠전의 주요 탐지체계로 사용되는 소나체계의 운용효과를 분석하기 위해서는 객체 수준의 모의가 이루어질 수 있도록 범위와 해상도를 결정해야 한다. 본 논문에서는 교전 수준의 M&S 체계를 위한 객체 단위의 소나 모의 방안을 제시하고자 한다. 이를 통해 플랫폼의 기동정보, 소나 탑재 조건 및 운용환경을 적용하여 작전모의 중 시간 진행에 따라 변화되는 소나 운용 효과를 분석할 수 있도록 한다.

2. 모의 개요

대부분의 소나는 수상함, 잠수함, 무인기, 어뢰와 같은 수중/수상 플랫폼과 헬기, 초계기 같은 공중 플랫폼에 장착되어 운용된다. 따라서 해군 작전교리에 따라 운용되는 소나의 작전 기여도를 평가하기 위해서는 기동상황에서 발생하는 소나의 운용조건이 반영되어 시간의 흐름에 따른 소나의 운용 성능을 모의할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 각 소나모델이 객체 단위로 모의되어야 하며, 각 객체의 제원과 특성이 반영되어 모의될 수 있어야 한다.

교전급의 모델 수준은 사용자의 판단에 따라 다양하게 나타날 수 있으므로, 본 논문에서는 아래와 같이 모의 범위에 따른 주요 고려 사항을 정의하였다.

- (1) 소나체계가 독립객체로 모의되어야 한다.
- (2) 플랫폼 모델에 탑재되어 운동변화에 따라 모의되어야 한다.
- (3) 운용환경에 의한 시공간적 변동성이 반영되어 모의되어야 한다.
- (4) 소나 제원에 따른 성능변화가 모의되어야 한다.

Fig. 2는 플랫폼에 탑재되어 독립객체로 모의하기 위한 소나의 기능분할도이다. 총 10개의 기능 블록으로 이루어져 있으며, 각 블록은 Fig. 3과 같이 연결되어 모의된다.

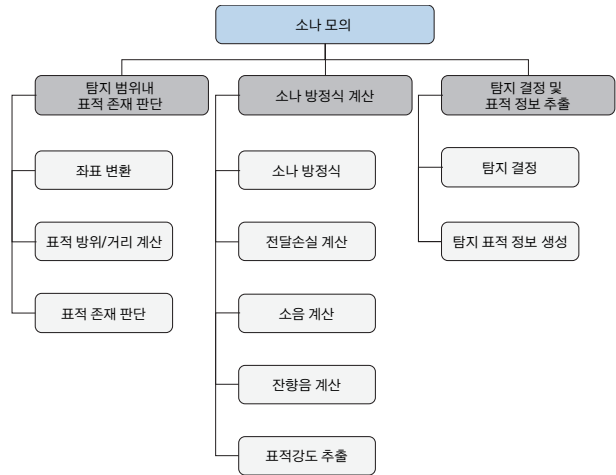


Fig. 2. 소나 모의 기능 분할도

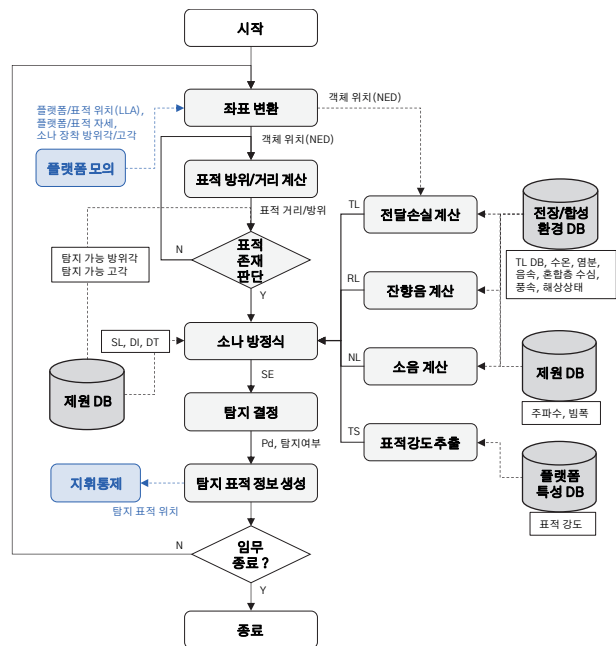


Fig. 3. 소나 모의 기능 흐름도

3. 탐지 범위내 표적 존재 판단

3.1 좌표 변환

플랫폼에 탑재된 소나 객체와 표적 사이의 상대 기하관계 연산을 위하여 측지좌표계 상에서 위도, 경

도, 고도로 주어지는 플랫폼 및 표적의 좌표를 항법 좌표계 및 센서 좌표계로 변환해야 한다. 센서와 표적 간(센서 위치 기준) 상대거리 계산은 항법좌표계로 변환하여야 계산할 수 있으며, 센서와 표적 간(센서 지향 기준) 상대방위 계산을 위해 항법좌표계의 좌표를 센서기준 좌표계로 한번 더 변환하여야 한다. 여기서, 항법좌표계로의 변환 시 센서의 위치는 장착된 플랫폼 위치를 기준으로 적용한다. Fig. 4는 소나와 표적의 상대거리와 방위를 계산하기 위한 좌표계 변환 순서를 도식화한 것이다.

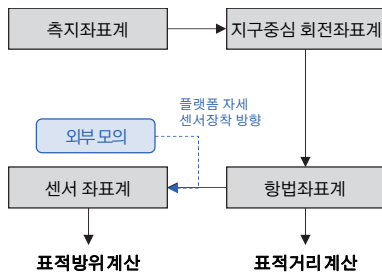


Fig. 4. 좌표계 변환 순서

3.1.1 측지좌표계에서 지구중심회전좌표계로 변환

플랫폼 위치 정보의 지구중심회전좌표 변환은 위도, 경도, 고도/심도로 주어지는 플랫폼 객체의 좌표를 항법좌표계로 변환하기 위한 중간 과정이며, 식 (1)을 통해 변환할 수 있다.

$$X_{ref}^E = (R_\lambda + h_{ref}) \cos \Phi_{ref} \cos \Lambda_{ref} \tag{1a}$$

$$Y_{ref}^E = (R_\lambda + h_{ref}) \cos \Phi_{ref} \sin \Lambda_{ref} \tag{1b}$$

$$Z_{ref}^E = [(1 - \epsilon^2)R_\lambda + h_{ref}] \sin \Phi_{ref} \tag{1c}$$

$$R_\lambda = \frac{R_{e1}}{\sqrt{1 - \epsilon^2 \sin^2 \Phi_{ref}}} \tag{1d}$$

$$\epsilon = \frac{\sqrt{R_{e1}^2 - R_{e2}^2}}{R_{e1}} \tag{1e}$$

$$R_{e2} = R_{e1}(1 - f) \tag{1f}$$

여기서, $[X_{ref}^E, Y_{ref}^E, Z_{ref}^E]$: 지구중심좌표계의 좌표 위치 (m),

$[\Phi_{ref}, \Lambda_{ref}, h_{ref}]$: 측지좌표계의 좌표 위치 (deg, deg, m),

R_λ : 위도 Φ 에서 동서의 곡률 반지름(m),

R_{e1} : WGS84 지구타원체 장반경,

$R_{e2} = R_{e1}(1 - f)$: WGS84 지구타원체 단반경,

ϵ : 지구타원체 1차 이심율,

f : WGS84 지구타원체 모델의 편평도.

3.1.2 지구중심회전좌표계에서 항법좌표계로 변환

식 (2)는 지구중심회전좌표계의 좌표를 항법좌표계로 변환하기 위한 수식이다. 여기서 소나는 플랫폼 위치와 동일 위치로 가정하여, 기준좌표는 플랫폼의 위치 좌표값을 사용한다.

$$\begin{bmatrix} X_{ref}^N \\ Y_{ref}^N \\ Z_{ref}^N \end{bmatrix} = C_E^N \begin{bmatrix} X_{ref}^E \\ Y_{ref}^E \\ Z_{ref}^E \end{bmatrix} \tag{2a}$$

$$C_E^N = \begin{bmatrix} -\sin \Phi_{ref} \cos \Lambda_{ref} & -\sin \Phi_{ref} \sin \Lambda_{ref} & \cos \Phi_{ref} \\ -\sin \Lambda_{ref} & \cos \Lambda_{ref} & 0 \\ -\cos \Phi_{ref} \cos \Lambda_{ref} & -\cos \Phi_{ref} \sin \Lambda_{ref} & -\sin \Phi_{ref} \end{bmatrix} \tag{2b}$$

여기서, C_E^N : 방향전환행렬

(식 (2b) 우변: 좌표 위치(m)),

$[X_{ref}^N, Y_{ref}^N, Z_{ref}^N]$: 항법좌표계의 좌표 위치 (m).

3.1.3 항법좌표계에서 센서 좌표계로 변환

플랫폼에 장착된 소나와 표적의 상대적인 기하학적 관계를 계산하기 위하여 플랫폼의 운동상태(roll, pitch, yaw) 및 플랫폼에 부착된 센서의 장착 상태(장착 고각, 장착 방위각)를 고려하여 계산한다. 이를 위하여 항법좌표계를 센서 좌표계로 변환해야 하며, 식 (3)을 통해 변환할 수 있다.

$$POS_S(x, y, z) = C_B^S C_N^B POS_N(x, y, z) \tag{3a}$$

$$C_N^B = R_1(\phi)R_2(\theta)R_3(\psi) \tag{3b}$$

$$C_B^S = R_1(0)R_2(\theta_s)R_3(\psi_s) \tag{3c}$$

$$R_1(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3d)$$

$$R_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3e)$$

$$R_3(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3f)$$

$$R_1(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3g)$$

$$R_2(\theta_s) = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & 0 & -\sin \theta_s \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_s & 0 & \cos \theta_s \end{bmatrix} \quad (3h)$$

$$R_3(\psi_s) = \begin{bmatrix} \cos \psi_s & \sin \psi_s & 0 \\ -\sin \psi_s & \cos \psi_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3i)$$

여기서, ϕ : 플랫폼 자세 roll(deg),
 θ : 플랫폼 자세 pitch(deg),
 ψ : 플랫폼 자세 yaw(deg),
 θ_s : 센서 장착 지향 고각(deg),
 ψ_s : 센서 장착 지향 방위각(deg).

3.2 표적 방위/거리 산출

소나와 표적 사이의 거리(r)는 플랫폼 위치 기준의 항법좌표계로 변환한 소나와 표적의 좌표값을 식 (4)에 대입하여 계산할 수 있다.

$$POS_N(x, y, z) = Target_N(x, y, z) - Sensor_N(x, y, z) \quad (4a)$$

$$r = \sqrt{POS_N(x)^2 + POS_N(y)^2 + POS_N(z)^2} \quad (4b)$$

여기서, r : 표적 거리(m),
 $Target_N(x, y, z)$: 표적 위치(m),
 $Sensor_N(x, y, z)$: 센서 위치(m).

센서와 표적의 방위각($\beta_{azimuth}$)과 고각($\beta_{elevation}$)은 식 (4)에서 계산된 상대좌표($POS_S(x, y, z)$)를 식 (5)에 대입하여 계산할 수 있다.

$$\beta_{azimuth} = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (5a)$$

$$\beta_{elevation} = \tan^{-1}\left(\frac{-z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \quad (5b)$$

여기서, $\beta_{azimuth}$: 센서에서 바라본 표적의 방위각(deg),
 $\beta_{elevation}$: 센서에서 바라본 표적의 고각(deg).

3.3 표적 존재 판단

표적 방위각($\beta_{azimuth}$)과 고각($\beta_{elevation}$)이 식 (6)의 조건을 만족하면, 표적이 센서의 방위각 범위와 고각 범위 내에 있다고 판단한다.

$$|\beta_{azimuth}| \leq \text{센서의 방위각 범위}/2 \quad (6a)$$

$$|\beta_{elevation}| \leq \text{센서의 고각 범위}/2 \quad (6b)$$

소나의 플랫폼 탑재 상태와 탐지 범위를 고려하여 표적 존재를 판단하는 것은 다수의 객체 교전 중에서 탐지 연산 대상을 식별함으로써 전체적인 모의의 부하를 낮추는 데 목적이 있다.

4. 소나방정식 계산

4.1 소나방정식

소나 방정식은 수중음향학에서 소나 모의를 위해 일반적으로 사용하고 있으며 식 (7)과 같이 정의된다. 소나방정식은 소나의 제원과 표적의 정보, 운용 환경을 모두 포함하고 있는데 각 항목의 계산 방법과 수준이 모의 목적에 따라 다양하게 적용된다. 일반적으로 전구급 모델에서는 소나방정식 각 항을 변수로 처리하거나 단순한 수식으로 모의하는 경우가 대부분이며, 설계를 위한 공학급에서는 항목별로 충실도가 높은 복잡한 식을 적용하거나 별도의 정밀한 공학 모델을 이용하여 값을 산출하기도 한다.

$$ASE = SL - 2TL - (RL \oplus NL) + TS + DI - DT \quad (7)$$

여기서, ASE(signal excess): 능동소나의 신호초과이득(dB),

SL(source level): 음원 준위(dB),

TL(transmission loss): 음파전달손실(dB),

RL(reverberation level): 잔향음 준위(dB),

NL(noise level): 소음 준위(dB),

TS(target strength): 단상태 음향표적강도(dB),

DI(directivity index): 수신지향지수(dB),
 DT(detection threshold): 신호 검출임계치 (dB).

본 논문에서 제시하는 교전급 수준의 소나방정식에서 소나의 제원에 해당하는 음원준위(SL), 수신지향지수(DI), 탐지문턱(DT)은 소나의 제원 DB로부터 변수로 처리하며, 표적 강도(Ts)는 표적의 특성DB를 통해 변수로 처리한다. 단, 표적강도는 방향별 특성값이 다르게 발생하므로 소나와 표적 간의 측면각(aspect angle)을 산출하여 값을 추출한다. 그리고 환경적 변동요인을 반영하기 위해 전달손실(TL), 소음준위(NL)와 잔향음 준위(RL)는 전장/합성환경DB를 기반으로 해당하는 요소값을 반영하여 각 항목별 교전급 수준의 식을 정의하고 적용한다. 각 항목에 대한 상세 내용은 다음 절에서 소개한다.

4.2 전달손실 계산

전달손실은 음파의 물리적 성질 및 환경적 요인에 의해 발생하는 손실로 확산 손실(spreading loss), 흡수 손실(absorption loss), 산란 손실(scattering loss)이 이에 해당된다. 즉, 환경적인 요인에 따라 변동성이 크게 나타나는데 정확한 전달손실 계산을 위해서는 음선이론이나 포물선방정식을 이용한 공학급 모델을 통해 계산되어야 한다. 하지만, 몬테카를로 시뮬레이션 등 연산속도가 빠르게 요구되는 교전급 수준의 모의를 위해서는 공학급 모델 적용이 제한적일 수밖에 없다. 따라서 본 논문에서는 사용자의 분석 목적에 따라 운용환경 적용이 제한적으로 가능한 수식과 공학 모델 결과를 합성환경DB로 구축하여 적용하는 방안을 제시한다. 전달손실은 식 (8)과 같이 소나의 주파수와 해저 수심 값을 적용하여 계산할 수 있다.

$$TL = 10 \log(r_0) + 10 \log(r) + (\alpha + \alpha_L)r \times 10^{-3} \quad (8a)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{RH}{8}} \sqrt{\frac{H}{H-d}} \quad (8b)$$

$$\alpha = A \frac{Sf_T f^2}{f_T^2 + f^2} + B \frac{f^2}{f_T} \quad (8c)$$

$$\alpha_L = 6.6(1.4)^{SS} H^{-\frac{1}{2}} \quad (8d)$$

여기서, r_0 : 전환거리(m),
 α : 흡수계수(dB/m),
 α_L : 누설계수(dB/m),
 r : 표적까지의 거리(m),
 H : 혼합층 채널의 수심(m, 혼합층 미 존재시 수심값 적용),
 SS : 해상상태등급,
 d : 소나의 운용 심도(m),
 $R = C_0/0.016$: 음향 ray의 곡률반경(m),
 C_0 : 소나 운용 심도에서의 수중 음속(m/sec),
 S : 염분 함유도(%),
 f : 소나 주파수(kHz),
 $A = 1.86 \times 10^{-2}$,
 $B = 2.68 \times 10^{-2}$
 $f_T = 21.9 \times 10^{6-1.520/(T+273)}$: 온도종속 이완주파수(kHz),
 T : 수온(°C).

사용자의 분석 목적에 따라 고해상도의 해양환경을 적용한 소나의 운용효과를 분석하기 위해서는 모의 전 합성환경DB를 구축하여 필요한 전달손실 값을 추출할 수 있어야 한다.

합성환경DB의 전달손실은 Fig. 5와 같이 소나가 운용되는 임무영역과 소나 심도에 해당하는 격자별 데이터가 구성되어 있으며, 한 개의 격자에 해당하는 음장(acoustic TL field) 파일은 8방위에 대해 구성되어 있다. 이와 같은 합성환경 데이터 생성은 사용자가 분석하고자 하는 계절, 소나 특성(주파수, 빔폭에 따른)을 적용하여 모의 전에 생성한다. 플랫폼의 소나가 해당 셀에 위치하면 8개 방위 중 소나와 표적 간의 방위에 가장 가까운 음장 파일을 사용하며, 표적의 거리, 심도 정보(측지좌표계의 표적 심도)에 따른 TL 값을 추출할 수 있다. 음장 파일은 소나의 위치

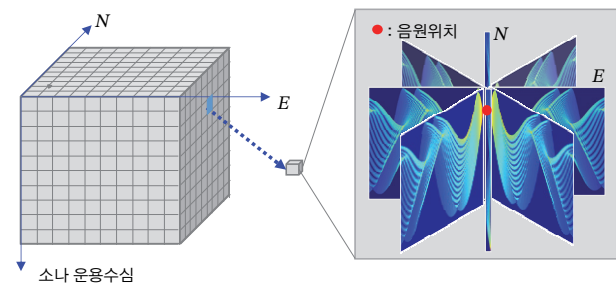


Fig. 5. 임무지역의 격자별 합성환경DB 구성도

를 기준으로 거리별, 수심별 값을 제공한다. Fig. 6은 선택된 음장 파일에서 표적의 수심, 거리에 따라 전달손실 값을 추출하는 개념을 도식화한 것이다.

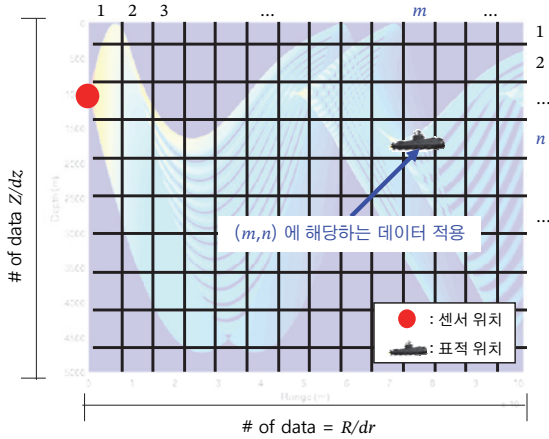


Fig. 6. 음장 파일에서 표적 위치의 TL 값 추출 개념

4.3 소음 계산

수중의 주변 소음(NL)은 수중음향에서 대표적으로 사용하는 식 (9)의 Wenz Curves를 이용한다. 수식에 필요한 풍속은 환경DB에서 운용 해역의 정보를 통해 적용한다.

$$NL_{ambient} = 10 \log \left(10^{\frac{N_I}{10}} + 10^{\frac{N_{II}}{10}} + 10^{\frac{N_{III}}{10}} + 10^{\frac{N_{IV}}{10}} \right) \quad (9a)$$

$$N_I = 107 - 30 \log(f) \quad (9b)$$

$$N_{II} = 76 - 20[\log(f) - \log(30)]^2 \quad (9c)$$

$$N_{III} = 44 + \sqrt{21v} + 17[3 - \log(f)][\log(f) - 2]; \quad f < 1 \text{ kHz} \quad (9d)$$

$$N_{III} = 95 + \sqrt{21v} - 17 \log(f); \quad f \geq 1 \text{ kHz} \quad (9e)$$

$$N_{IV} = -75 + 20 \log(f) \quad (9f)$$

여기서, N_I : 1 Hz - 20 Hz에서 주된 난류 소음원,
 N_{II} : 20 Hz - 50 Hz에서 주된 원거리
 항행선박에 의한 소음원,
 N_{III} : 500 Hz - 50 kHz에서 주된 해수면
 상태에 의한 소음원,
 N_{IV} : 20 kHz 이상의 해수 분자운동에 의한
 열소음 구역,
 f : 주파수(Hz),
 v : 풍속(kts).

4.4 잔향음 계산

잔향음은 해수면-해저면의 상태, 해수 중 산란체에 의해 산란되어 오는 음의 총합으로 정의된다.

$$RL_{Total} = 10 \log \left(10^{\frac{RL_V}{10}} + 10^{\frac{RL_S}{10}} + 10^{\frac{RL_B}{10}} \right) \quad (10)$$

여기서, RL_{Total} : 총 잔향음 준위(dB),

RL_V : 체적 잔향음 준위(dB),

RL_S : 해수면 잔향음 준위(dB),

RL_B : 해저면 잔향음 준위(dB).

이와 같은 잔향음 모의는 군사적인 목적으로 대부분 소스가 공개되어 있지 않은 상태이고, 과도한 연산량이 요구되어 교전 수준의 모델에 적용하기는 극히 제한적이다. 따라서 다음과 같은 가정과 제약을 두고 개략화하여 모의한다.

- (1) 잔향음 모의는 음파의 직진 환경을 가정한다.
- (2) 경계면(해수면, 해저면) 산란은 1회만 고려하며 경계면 반사 후 산란은 고려하지 않는다.
- (3) 표적 탐지신호 도달 시간에 해당하는 잔향음(표적 거리와 동일한 거리에서 발생하는 잔향음)을 고려한다.

각 체적과 경계면의 잔향음은 식 (11)로 정의되며, 해수면 산란강도(S_S)는 Chapman and Harris(1962) 모델을 적용하고, 해저면 산란강도(S_B)는 Lambert 이론을 적용하여 계산한다.

$$RL_V = SL - 2TL_R + S_V 10 \log(V) \quad (11a)$$

$$RL_{S,B} = SL - 2TL_R + S_{S,B} + 10 \log(A) \quad (11b)$$

여기서, $V = \frac{c\tau}{2} \frac{\pi R^2 \theta_h \theta_v}{4}$: 산란체적,

$$A = \frac{c\tau}{2} R \theta_h$$
: 산란면적.

4.5 표적강도 추출

표적강도는 교전 중에 표적으로 입사되는 음파의 측면각(β_{aspect} , aspect angle)을 통해 표적제원DB에서 값을 추출한다. 측면각은 항법좌표계상에서 식 (12)와 같이 계산한다.

$$POS_N(x, y, z) = Sensor_N(x, y, z) - Target_N(x, y, z) \quad (12a)$$

$$POS_T(x_T, y_T, z_T) = C_N^B POS_N(x, y, z) \quad (12b)$$

$$\beta_{aspect} = \tan^{-1} \left(\frac{y_T}{x_T} \right) \quad (12c)$$

5. 탐지 결정 및 표적 탐지 정보 생성

5.1 탐지 결정

소나방정식으로부터 계산된 신호초과이득(SE)을 식 (13)에 적용하여 탐지 확률을 계산한다. 신호초과이득 0은 탐지 확률은 50 %임을 의미하며 σ 는 신호초과이득의 표준편차로서 통상적으로 해상시험을 통한 실험값으로 8 dB에서 9 dB 사이의 값을 갖는다.

$$P_d(SE) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{SE} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (13)$$

여기서, P_d : 탐지확률,

SE: 신호초과이득(dB),

σ : 신호초과이득의 표준편차.

도출된 탐지확률 값과 0과 1 사이의 균일분포 난수 발생 값을 비교하여 탐지 성공 또는 실패를 판정한다.

$$\begin{cases} x \leq P_d & \text{탐지 성공} \\ x > P_d & \text{탐지 실패} \end{cases} \quad (14)$$

여기서, x : 0과 1 사이의 균일분포(uniform) 난수 발생 값,

P_d : 탐지확률.

5.2 표적 탐지 정보 생성

표적 탐지 정보생성 모의는 탐지된 표적에 대해 실제 위치값에 대해 소나 유형별 분해능에 따른 오차를 포함하여 계산한다.

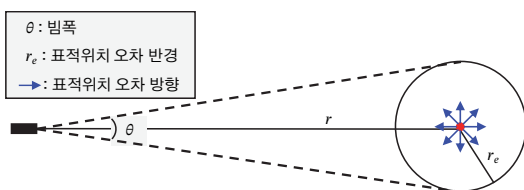


Fig. 7. 탐지 오차 발생 개념도

모의에서 생성되는 실제의 표적 위치에 오차 반경과 오차 방향을 랜덤하게 생성하여 식 (15)와 같이 계산된 표적 위치 오차 반경을 표준편차로 하는 정규분포 오차를 발생시킨다.

$$x_e = x + \cos(\alpha_e) \times e_h \quad (15a)$$

$$y_e = y + \sin(\alpha_e) \times e_h \quad (15b)$$

여기서, x_e, y_e : 오차를 포함한 표적 위치(m),

x, y : 모의 상의 표적 true 위치(m),

$\alpha_e = A \times 360$: 표적 방향 오차(deg, A는 0과 1 사이의 균일분포 난수)

$e_h = r_{he} \times B$: 표적 위치 오차 반경(B는 0과 1 사이의 정규분포 오차)

표적 위치 오차 최대 반경(r_{he})은 소나가 표적을 탐지할 때 소나의 빔폭(수신 분해능) 내에서 발생하므로 식 (16)과 같이 계산한다.

$$r_{he} = \theta_h \times \frac{\pi}{180} \times r \quad (16)$$

여기서, r_{he} : 표적 위치 오차 최대 반경(m),

θ_h : 소나 수평 수신 빔폭(수신 분해능, deg),

r : 센서-표적 거리(m).

6. 주요 기능 모의

플랫폼 간의 교전 모의를 위해 소나 객체는 독립객체로 모의가 가능하여야 하며, 플랫폼의 운동 변화에 따른 모의가 가능하여야 한다. 또한 운용환경의 시공간적 변동성 및 소나 제원에 따른 성능 모의가 가능해야 한다. 이를 위해 다음 두 경우에 주요 기능을 확인하였다.

6.1 플랫폼 운동 기반 좌표 변환

우선 탑재 소나를 HMS(hull mount sonar)로 가정하고 플랫폼의 운동 변화에 따른 소나 모의 변화를 확인하였다. 우선 플랫폼 기준 소나지향 수평 각도를 0°로 고정하고 플랫폼 운동 정보(yaw)를 0°, 45°, 90°로 변경하였다. 이에 따라 Fig. 8과 같이 변화하는 것을 확인하였다.

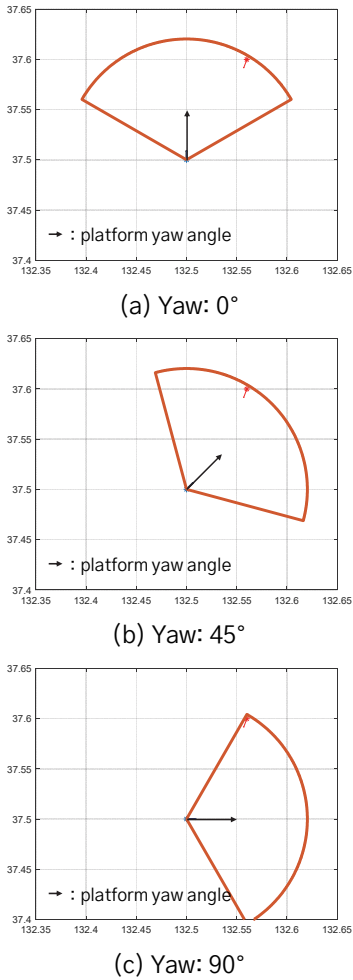


Fig. 8. 플랫폼 운동변화에 따른 좌표 변환(소나 장착 고정)

두 번째로 소나를 어뢰 탑재 소나로 가정하고 소나 지향 각도 변화에 따른 소나 모의 변화를 확인하였다. 우선 플랫폼 운동 정보(yaw)를 30°로 고정하고 소나지향 수평 각도를 -20°, 0°, 20°로 변경하였다. 이에 따라 Fig. 9과 같이 변화하는 것을 확인하였다.

6.2 합성환경 적용 표적 탐지 기능 모의

수중에서 소나는 운용환경의 시·공간적 변화에 따라 성능이 크게 변화하는데 특히 전달손실에 그 영향이 나타난다. 이에 따른 소나 모의 변화를 확인하기 위하여 여름철 및 겨울철 합성환경DB 적용 및 일반 전달손실 계산 수식에 따른 탐지결과를 비교하였다.

모의실험을 위해 동해의 Fig. 10과 같이 임의의 교전지역에서 Table 1의 시나리오에 따라 적 잠수함 침투에 대해 아군 수상함의 고정 능동소나의 탐지성능을 모의하였다.

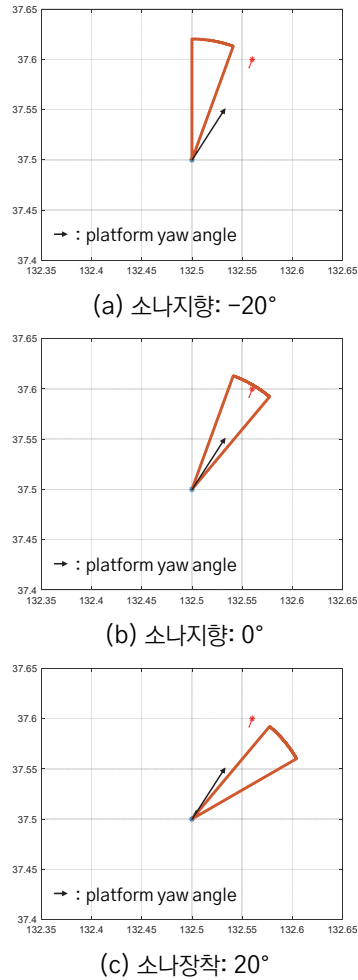


Fig. 9. 소나 장착각도에 따른 좌표 변환(플랫폼 운동 고정)

Table 1. 교전 시나리오

항목	내용
분석 목표	<ul style="list-style-type: none"> 교전 환경에 따른 소나 운용 효과 분석
교전 세력 및 환경 시나리오	<ul style="list-style-type: none"> 위치: 포항 앞바다 인근 아군 세력: 수상함 1척, 능동 고정소나 1식 소나 운용 수심: 10 m 적 세력: 잠수함 1척 표적 운용 수심: 85 m 해상상태: 2 환경DB: 수중 지형, 수온, 염분
제원	<ul style="list-style-type: none"> 소나 제원: SL, DI, DT, 주파수, 탐색 범위, 소나 탑재 방향 표적 제원: 표적 강도
모의 변수	<ul style="list-style-type: none"> 전달손실: 계산, 합성환경 DB 계절: 여름, 겨울 객체 변수: 모의 시간에 따른 플랫폼 운동 정보

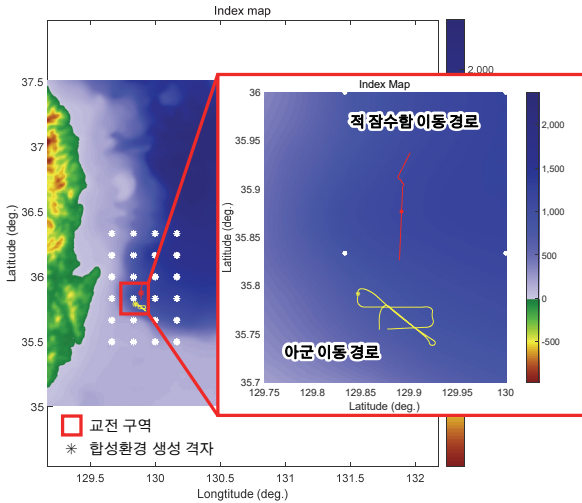
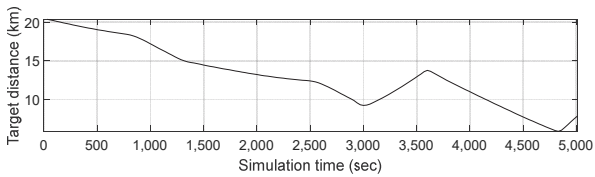
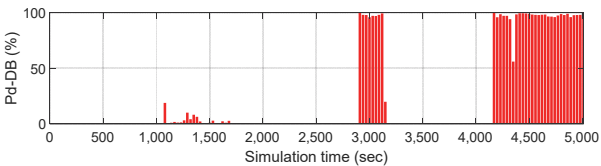


Fig. 10. 교전 시나리오에 따른 기동 경로

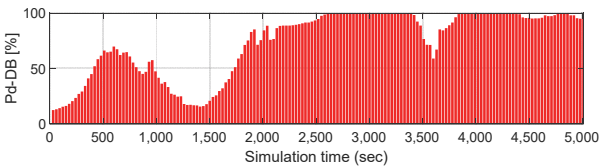
Fig. 11과 같이 운용환경에 따른 소나의 탐지 성능이 시간 변화에 따른 플랫폼 기동 정보를 반영하여 모의되는 것을 확인할 수 있다. 모의 결과 여름철의 소나 탐지 성능은 겨울철에 비해 제한적으로 나타났다.



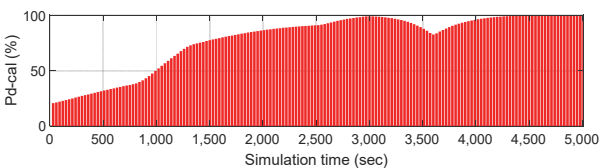
(a) 모의 시간에 따른 소나와 표적 거리 변화



(b) 여름철 합성환경 전달손실 적용 탐지확률



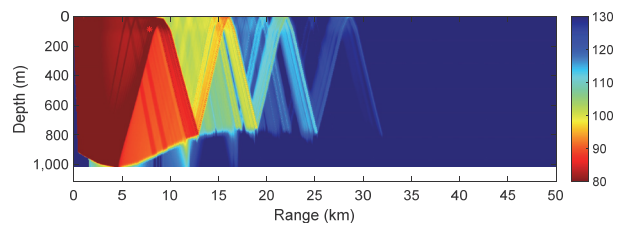
(c) 겨울철 합성환경 전달손실 적용 탐지확률



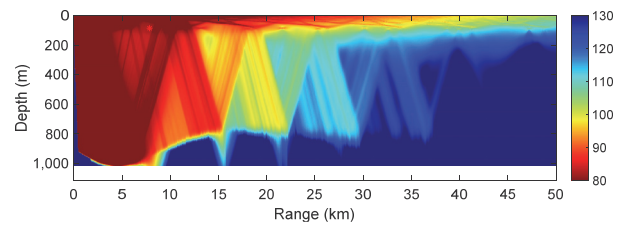
(d) 수식에 의한 전달손실 계산 값 적용 탐지확률

Fig. 11. 모의 시간 진행에 따른 표적 거리 및 탐지확률

탐지확률 50 % 기준으로 표적 수심에서 전달손실 계산 수식에 따른 최대탐지거리는 약 17 km이고, 합성환경DB 적용에 따른 여름철 최대 탐지거리는 약 10 km, 겨울철은 약 19 km임을 확인할 수 있다. 또한 겨울철에는 14 km - 16 km 구간에서 탐지확률 50 % 이하의 탐지 제한 구역이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 계절적 탐지성능 차이는 Fig. 12에서 확인할 수 있듯, 여름철에는 음파의 하향굴절로 인해 탐지 성능이 제한되며, 겨울철은 도파관 형성에 따라 장거리 탐지환경이 형성되기 때문이다.



(a) 여름철 적용 전달손실 음장 데이터



(b) 겨울철 적용 전달손실 음장 데이터

Fig. 12. 모의실험 적용 계절별 합성환경 전달손실(단위: dB)

7. 결론

일반적으로 M&S의 구성 모델은 각 분야의 전문지식을 기반으로 연구/개발되고 있으나, 개발 목적에 따른 분야별 모델링의 수준 및 개발 범위가 상이하여 통합 모델을 구성할 때 많은 어려움이 발생한다. 특히 교전수준 M&S를 위해 다수의 구성 모델 충실도가 공학적 수준으로 요구됨에 따라 각 분야별 구성 모델 개발 시 통합을 고려하여 입출력 정보와 모의 수준이 정의되어야 한다. 본 논문에서는 해군의 교전 수준 모의/분석 체계를 위해 플랫폼 객체기반의 소나 모의 방안을 제시하였다. 이를 위해 소나체계가 독립적으로 모의되도록 하였고, 플랫폼 모델의 운동 변화 및 소나 운용에 따른 소나 모의가 가능하도록 하였다. 또한 소나 탐지성능 분석의 주요 요인인 시공간적 변화

를 합성환경DB를 적용하여 모의가 가능하도록 하였다. 본 연구를 통해 향후 해군에서 대잠수함 작전 및 무기체계의 소요제기를 위한 모의 분석 수행에 많은 도움이 될 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] 방위사업청 매뉴얼 제2017-6호, M&S 적용 매뉴얼, 방위사업청, 2017.
- [2] DOD 5000.59-P, Modeling and Simulation(M&S) Master Plan, 1995.
- [3] Robert J. Urick, "Principles of Underwater Sound", 3rd Edition, 1983.
- [4] SONAR for Practising Engineers, 3rd Edition, A. D. Waite, 2002.
- [5] Underwater Acoustic Modeling and Simulation, 3rd Edition, Paul C. Etter, 2003.
- [6] APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook Technical Report, Applied Physics Laboratory University of Washington, APL-UW TR9407, 1994.
- [7] Carlo M. Ferla and Michael B. Porter, "Receiver Depth Selection for Passive Sonar Systems," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 16, No. 3, 1991.
- [8] Wenz, G. M., "Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources", J. Acoust. Soc. Am., 34, 1936-1956, 1962.
- [9] Walt Sadowski, Richard Katz, and Kathleen McFadden, "Ambient Noise Standards for Acoustic Modeling and Analysis," NUSC Technical Document 7265, 3 August 1984.
- [10] C. M. Ferla and M. B. Porter, "Receiver Depth Selection for Passive Sonar Systems", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 16, No. 3, 1991.