

이산 사건/이산 시간 혼합형 시물레이션 모델 구조를 사용한 유도 어뢰의 탐지 효과도 분석

하 솔¹ · 차주환^{2†} · 이규열³

Analysis of Detecting Effectiveness of a Homing Torpedo using Combined Discrete Event & Discrete Time Simulation Model Architecture

Sol Ha · Ju Hwan Cha · Kyu Yeul Lee

ABSTRACT

Since a homing torpedo system consists of various subsystems, organic interactions of which dictate the performance of the torpedo system, it is necessary to estimate the effects of individual subsystems in order to obtain an optimized design of the overall system. This paper attempts to gain some insight into the detection mechanism of a torpedo run, and analyze the relative importance of various parameters of a torpedo system. A database for the analysis was generated using a simulation model based on the combined discrete event and discrete time architecture. Multiple search schemes, including the snake-search method, were applied to the torpedo model, and some parameters of the torpedo were found to be stochastic. We then analyzed the effectiveness of torpedo's detection capability according to the torpedo speed, the target speed, and the maximum detection range.

Key words : Homing Torpedo, Detecting Effectiveness, Discrete Event Simulation, Discrete Time Simulation.

요 약

음향 탐지나 항적 탐지 등을 이용하여 표적을 추적하는 유도 어뢰는 개념 설계 단계에서부터 군 요구를 분석하고 군 요구에 따른 어뢰의 개략 설계 사양 도출을 필요로 한다. 이를 위해 이산 사건/이산 시간 혼합형 시물레이션 모델 구조를 적용하여 어뢰가 목적하고 있는 탐지 임무의 정량적인 달성 정도를 나타내는 탐지 효과도를 분석하였다. 어뢰의 탐지 효과도 분석을 위해 초기 개념 설계 단계에서 주어지는 어뢰의 개략적인 설계 변수를 바탕으로 어뢰와 표적의 수학 모델을 설정하였으며, 이와 함께 이산 사건/이산 시간 혼합형 시물레이션 모델 구조를 적용하여 아 잠수함 모델, 어뢰 모델, 표적 모델을 구성하였다. 특히 어뢰 모델에는 유도 어뢰의 특성을 고려하여 탐색 운동 방법, 음향 탐지 방법 등을 적용하였으며, 각 모델을 구성하는 설계 변수에는 오차 모형을 반영하였다. 이를 바탕으로 어뢰가 표적을 탐지하는 과정에 대해 반복 시물레이션을 수행하여 설계 변수 변화에 따른 어뢰의 탐지 효과도를 분석하였다.

주요어 : 유도 어뢰, 탐지 효과도, 이산 사건 시물레이션, 이산 시간 시물레이션

1. 서 론

1.1 연구 배경

무기 체계를 효과적으로 개발하기 위해서는 체계 개발 초기 단계부터 무기 체계의 효과도를 분석하여 무기 체계의 사양이나 부체계 사양을 도출하고 이에 대한 적절성 검토가 지속적으로 수행되어야 한다. 음향 탐지나 항적 탐지 등을 이용하여 표적을 추적하는 유도 어뢰의 경우 어뢰의 표적 탐지 능력을 극대화하는 것이 요구되며, 이

2009년 6월 16일 접수, 2009년 9월 8일 채택

¹⁾ 서울대학교 대학원 조선해양공학과

²⁾ 서울대학교 공학연구소

³⁾ 서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소

주 저 자 : 하 솔

교신저자 : 차주환

E-mail: jhcha79@snu.ac.kr

는 발사함에서 입력한 표적 정보의 정확도를 비롯하여 어뢰의 음향 탐지 능력, 채택된 탐색 운동 형태 등의 영향을 고려하여 평가하여야 한다. 그러나 어뢰의 개념 설계 단계에서는 상세한 어뢰의 기술 변수를 알 수 없는 상황에서 개략적인 어뢰의 사양이 결정되어야 하며, 이를 위해 여러 어뢰의 체계/부체계 사양 간의 개략적인 성능 비교가 이루어져야 한다. 개념 설계 단계에서 유도 어뢰의 탐지 효과도 분석은 어뢰의 기술 변수와 전술 변수에 대한 인수 해석을 수행하여 개발 체계의 개략적인 목표 사양을 결정하는 것이 가장 큰 목적이다.

- 기술 변수: 속도, 최대 항주 거리, 선회 성능, 기술적 탐지 거리, 음향 빔 특성 등
- 전술 변수: 발사 거리, 공격 각, 표적 속도, 표적 형상, 탐색 방법, 전술적 탐지 거리 등

한편, 군 요구 분석이나 체계 효과도 분석은 체계 개발 초기 단계에서부터 수행되어야 하는데, 체계 개발 사업 준비 기간이나 인력 등의 부족으로 이를 위한 Modeling and Simulation(M&S)을 구성하는 데 어려움을 겪고 있는 것이 현실이다. 따라서 추후 수중 교전 시뮬레이션에 공통적으로 사용될 수 있도록 재사용성과 상호 운용성을 갖는 대표적인 모델들이 미리 확보되어 있다면 체계 개발 착수와 동시에 이들을 사용하여 M&S를 구성할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 유도 어뢰의 탐지 효과도 해석과 관련한 탐지 확률의 계산 기법을 이용하여 유도 어뢰의 탐지 효과도를 분석하였다. 그리고 공학 수준에서의 시뮬레이션 등과 같이 앞으로의 확장성을 고려하여 탐지 효과도 분석에 필요한 어뢰, 표적, 아 잠수함 모델을 이산 사건/이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조를 사용하여 구현하였다.

1.2 관련 연구 현황

유도 어뢰의 탐지 효과도 분석과 관련된 연구는 주로 새로운 어뢰의 개발과 관련이 깊다. Mjælde(1977)는 유도 어뢰의 탐지 효과도 분석을 위해 어뢰의 운동과 탐지 과정에 대한 간단한 수학적 모델을 제시하였다. 어뢰의 운동을 질점의 운동으로 단순화 하고, 어뢰의 탐지 과정을 Urick(1967)이 제시한 능동 소나 방정식에 몇 가지 가정을 추가하여 간략히 표현하였다. 또한 효과도 분석을 위한 반복 시뮬레이션을 위해 정규 분포와 같은 간단한 확률 분포를 도입하였다. 그러나 체계적인 시뮬레이션 모델

을 도입하여 시뮬레이션을 수행하지는 않았다.

영국에서는 과거 어뢰 공격 효과도 분석을 위한 ‘THOR’를 자체 개발하여 사용하였다. 이 시스템은 잠수함 및 수상함의 어뢰 공격 효과도 및 대항책 효과도 분석, 그리고 효과적인 어뢰 회피 전술 연구에 사용되었으며, 수학적 모델링 및 몬테카를로 기법을 사용하였다(EDS Defence Limited, 1993). 최근에는 ‘ODIN’이라는 어뢰 효과도 분석용 시뮬레이션 시스템을 개발하여 사용 중에 있다 (Robinson, 2001).

국내에서도 어뢰의 효과도 분석을 위한 연구가 진행된 사례가 있다. 윤현규(1996)는 Mjælde(1977)가 제시한 어뢰의 간략한 수학적 모델에 Doppler 효과의 영향이나 Gyro Sensor의 계측 오차 등을 고려하여 어뢰의 효과도 분석 방법을 제시하였다. 허성필(1996)은 어뢰 효과도 분석 시 필요한 모의실험 모델을 쉽게 분석할 수 있도록 메타 모델을 도입하여 모의실험 결과를 분석하였다.

본 논문에서는 어뢰 효과도 분석을 위해 Mjælde(1977)와 윤현규(1996)가 사용한 기존의 어뢰의 운동 및 탐지 모델을 사용하였다. 그리고 보다 정형화된 시뮬레이션 모델의 정립과 향후 확장성을 고려하여 효과도 분석에 필요한 시뮬레이션 모델을 이산 사건/이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조를 사용하여 구현하였다.

2. 어뢰 공격/운용 전술 상황

잠수함 및 어뢰의 공격/운용 전술 시나리오는 다음과 같은 과정으로 전개된다.(그림 1 참조, 함승호 등, 2008)

- (1) 잠수함 잠항
- (2) 방책 임무 수행
- (3) 적함 발견, 표적 기동 분석 수행
- (4) 어뢰 발사, 탐색 가능 거리까지 직진
- (5) 탐색 시작
- (6) 어뢰의 잠수함 발견, 침로 변경
- (7) 적 잠수함의 어뢰 회피 기동 수행
- (8) 적 잠수함 격침
- (9) 임무 완료 후 잠수함 부상

본 논문에서는 어뢰의 공격/운용 전술 상황에서 어뢰 발사 및 탐색과 관련된 전술(그림 1의 (4), (5))을 대상으로 하고 있다. 특히 초기 개념 설계 단계에서 문제를 단순화하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다(Mjælde, 1977).

- ① 어뢰와 표적은 동일 심도에 위치하며, 어뢰는 수평

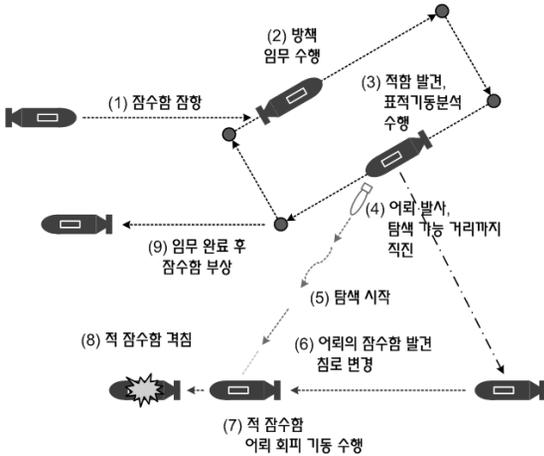


그림 1. 잠수함 및 어뢰의 공격/운용 전술

면 탐색을 수행한다.

- ② 어뢰와 표적의 진행 방향과 속도는 일정하다.
- ③ 일반적인 경우 표적이 어뢰 회피 기동을 수행하나 (그림 1의 (7)) 본 연구에서는 표적의 회피 기동이 없다고 가정하였다.
- ③ 어뢰는 발사 직후부터 표적 탐색을 시작한다.

표적이 수상함인 경우 수직면 탐색은 의미가 없고 잠수함 표적 시에도 수평면 거리에 비하여 어뢰의 표적 심도 변화가 작을 것이므로 어뢰와 표적이 동일 심도에 위치한다고 가정한다(가정 ①). 표적의 회피 기동은 표적이 어뢰에 대한 위협을 알았을 때 이루어지며, 그 순간 이미 어뢰는 표적을 탐지하였을 확률이 높으므로 탐지 전까지 회피 기동이 없다고 가정한다(가정 ③). 그리고 실제로 원거리 공격 어뢰의 경우 발사 후 일정 거리를 주행한 후 표적 근처에서 탐색을 시작하지만(그림 1의 (4), (5)), 본 논문에서는 발사 직후부터 표적을 탐색한다고 가정하였다(가정 ④).

3. 효과도 분석

무기 체계의 운용 성능은 그 체계가 목적하고 있는 임무의 달성 정도, 즉 효과도로 표현된다. 본 논문에서는 어뢰의 탐지 효과도 측정 지수로 잠수함이 어뢰를 발사하였을 때 어뢰가 표적(적 수상함, 적 잠수함)을 탐지할 확률을 계산하였다. 또한 어뢰의 기술 변수와 전술 변수가 효과도에 어떤 영향을 주는 지 분석하기 위해 어뢰 체계의

기술적인 특징과 작동 기능, 운용 상황 등을 기술/전술 변수를 이용하여 수학적으로 모델링하거나 경험적으로 증명된 근사식을 사용하여 효과도를 산출하였다. 문제의 단순화를 위해 2장에서 설명한 것과 동일하게 일부 조건을 가정하였으며, 이를 바탕으로 표적 모델, 어뢰 모델에 대해 수학 모델을 설정하였으며, 확률 계산을 위해 주요 변수들에 오차 모형을 적용하였다.

3.1 표적 모델

가정에 따라 표적은 일정 속도로 직진 주행을 하며 회피 기동은 없다. 따라서 표적의 위치 \mathbf{x}_{target} 는 다음과 같이 속도 벡터에 의해 결정된다(Mjeld, 1977).

$$\mathbf{x}_{target}(t) = \mathbf{x}_{target}(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{v}_{target}(t) dt$$

여기서 \mathbf{v}_{target} 는 표적의 속도 벡터이다. 표적의 위치는 공간고정좌표계에 대해서 정의하며, 기본 가정에 의해 표적의 속도는 상수 벡터로 입력한다.

3.2 어뢰 모델

3.2.1 어뢰의 발사

잠수함에서는 적함을 탐지하면 표적 기동 분석(Target Motion Analysis; TMA)을 수행하여 적의 방향과 거리, 속도를 비롯한 목표물의 운동학적인 상태를 추정한다(Cho 등, 2007). 표적 기동 분석을 통해 적함의 위치와 주행 방향, 속도를 추정하면 이를 이용하여 어뢰의 발사각을 계산하여 어뢰를 발사한다. 어뢰의 발사각 계산 방법에는 Collision Course Method(CCM) 방법과 Bearing Rider Method(BRM) 방법이 있다.

① Collision Course Method(CCM)

어뢰 발사각은 표적 속도, 표적 진행 방향, 어뢰 속도 등의 정보를 토대로 그림 2와 같이 어뢰 발사각을 계산한다.

$$\psi_{DA} = \sin^{-1} \frac{\mathbf{v}_{target} \times \sin \phi_{ASP}}{\mathbf{v}_{torpedo}}$$

여기서, ψ_{DA} : 발사각(deflection angle)

ϕ_{ASP} : 공격각(attack angle)

$\mathbf{v}_{torpedo}$: 어뢰의 속도

\mathbf{v}_{target} : 표적의 속도

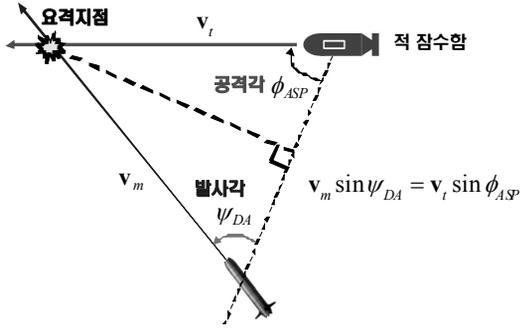


그림 2. Collision Course Method

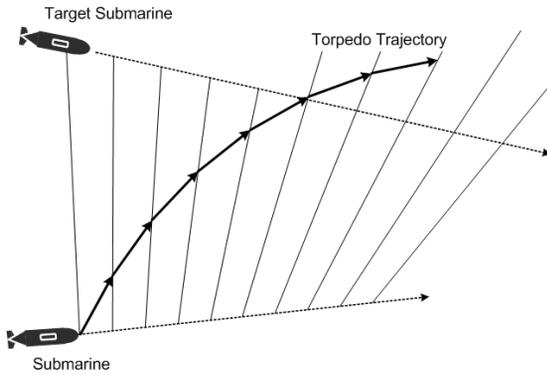


그림 3. Bearing Rider Method

② Bearing Rider Method(BRM)

매 단위 시간 어뢰가 아 잠수함과 표적을 연결한 직선 위에 위치하도록 어뢰의 궤적을 계산하여 발사한다.

본 논문에서는 어뢰의 속도와 진행 방향을 일정하게 유지한다고 가정하였기에 어뢰 발사각 계산 방법으로 Collision Course Method를 사용하였다.

3.2.2 어뢰 운동 모델

① 탐색 방법

어뢰는 보유한 음향 탐지 시스템이 탐지할 수 있는 영역이 최대로 증가되도록 주어진 탐색 방법에 따라 기동한다. 탐색 방법에는 사형 탐색(snake search), Corridor 탐색, 빔 조정 탐색(beam steering search), 원형 탐색(circle search) 등이 있다(그림 4, 윤현규, 1996). Corridor 탐색이나 빔 조정 탐색의 경우 사형 탐색과 같이 연속적으로 전 영역을 탐색할 수 없는 단점이 있기에 본 논문에서는 어뢰의 탐색 방법으로 사형 탐색 방법을 사용하였다.

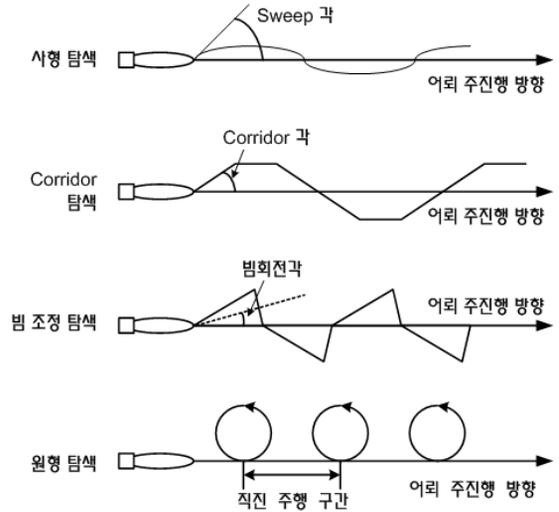


그림 4. 어뢰의 탐색 방법

사형 탐색은 명칭대로 뱀처럼 좌우로 회전하면서 sweep 각 범위 안에서 표적을 탐색하는 방법이다. 사형 탐색 운동을 위한 입력 값으로는 탐색 선회 각속도와 sweep 각이 있다.

② 어뢰의 운동

가정에 따라 어뢰는 일정한 속도로 주행한다. 본 논문에서는 어뢰의 탐색 방법으로 사형 탐색 방법을 사용하기 때문에 선회 각속도와 sweep 각에 따라 변화하는 어뢰의 위치를 그림 5와 같이 계산하였다(하술 등, 2009).

어뢰와 표적의 위치를 기준으로 좌표계를 그림 5의 (a)와 같이 설정하고, 선회각(β)과 발사각(ψ_{DE})에 따라 변화하는 어뢰 속도의 x, y 방향 성분은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{torpedo,x} &= |\mathbf{v}_{torpedo}| \cos(\psi_{DA} + \beta) \\ v_{torpedo,y} &= |\mathbf{v}_{torpedo}| \sin(\psi_{DA} + \beta) \end{aligned}$$

여기서, $\mathbf{v}_{torpedo}$ 은 어뢰의 속도

각 위치에서의 속도를 시간에 따라 적분하면 어뢰의 위치를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mathbf{r}_{torpedo}(t) = \int_{t_0}^t \mathbf{v}_{torpedo}(t) dt$$

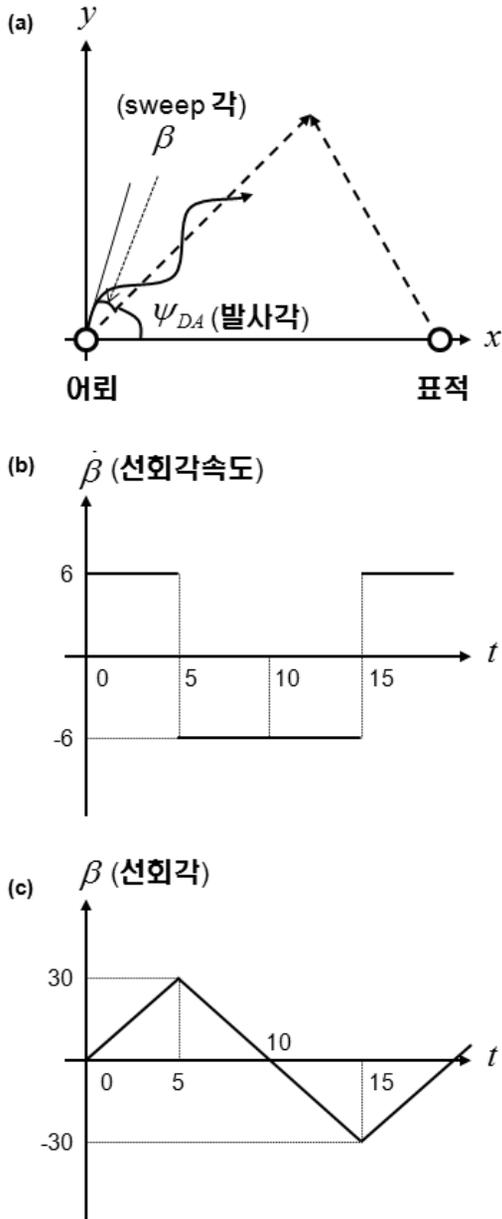


그림 5. 사형 탐색 운동에 따른 어뢰의 위치 결정 (하솔 등, 2009)

3.2.3 어뢰 탐지 모델

Mjelde(1977)는 어뢰의 탐지 모델에 대해 개념 설계 단계에서 주어지는 어뢰의 개략적인 사양을 바탕으로 표적의 탐지 여부를 판단할 수 있는 어뢰의 탐지 모델을 기

술하였다.

어뢰의 음향 탐지부에서 송출되는 음향 에너지가 표적에 맞고 되돌아오는 반향음이 설정된 임계치 이상이면 탐지로 간주한다. 탐지 여부는 주어진 Ping 세기에 대한 탐지 임계치, 표적까지의 거리, 표적 세기, 어뢰와 표적간의 발사각에 대한 함수 관계로 주어진다. 주변 소음, 자체 소음, 복반사음 등의 환경 영향은 고려하지 않았다

① 빔 특성

빔 패턴은 음향 탐지부의 소자 배열 및 각 소자들의 송출 가중치들에 따라 여러 가지 형태를 갖는다. 그러나 실제 소자들의 송출 가중치들은 알기 힘들므로 다음과 같이 빔폭(어뢰 송수신 장치에서 발생시키는 0dB기준의 주빔폭)만의 함수로 표현하였다(Urick, 1967).

$$G(\theta) = G_0 \left| \frac{\sin x\pi}{x\pi} \right| \cos \frac{\theta}{2}, \quad x = \frac{\theta}{\theta_0}$$

여기서, G_0 : 최대 gain 값

θ : 발사각

θ_0 : 주빔폭

② 거리에 따른 전달 손실(Transmission Loss; TL)

음향 신호 세기의 감소는 주로 Spreading과 Absorption 때문이다. Absorption은 송신 주파수, 염도 등과 함수 관계가 있다. 본 시뮬레이션에서는 문제의 단순화와 실제 Spreading이 Absorption의 영향보다 훨씬 크므로 Absorption에 의한 전달 손실은 무시하기로 한다. 또한 이상적인 경우인 Spherical spreading을 가정하였다. Spherical spreading의 거리에 따른 전달 손실은 다음과 같다.

$$I = \frac{I_0}{R^2}$$

여기서, I : 거리 R 에서의 세기

I_0 : 1m 에서의 방사 세기

R : 거리(m)

③ 표적 세기(Target Strength; TS)

어뢰의 음향 탐지부에서 음향 신호를 송출하면 표적에 맞고 반사되어 다시 음향 탐지부로 되돌아온다. 이때의 반사되는 음향 신호인 표적 세기는 표적의 형태, 크기, 재

질, Aspect 각(표적의 진행방향과 어뢰의 탐지부 중심-표적의 무게 중심을 이은 선이 이루는 각) 등과 함수 관계에 있다. 본 시뮬레이션에서는 표적을 회전 타원체로 가정하였으며, 수평면 운동만을 고려한다고 하였으므로 표적세기는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma = \frac{\pi a^2 b^2 c^2}{(a^2 \cos^2 \phi_{ASP} + b^2 \sin^2 \phi_{ASP})^2} \cdot U \cdot \bar{R}$$

- 여기서, a : 회전 타원체의 반길이(m)
- b : 회전 타원체의 반폭(m)
- c : 회전 타원체의 반높이(m)
- ϕ_{ASP} : 공격각
- U : 척도 계수
- \bar{R} : 음향 반향 계수

척도계수는 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$U = \left[\begin{array}{l} 0.25163\phi_{ASP}^2 - 0.18555\phi_{ASP} \\ + 0.0365\sin\{3(\phi_{ASP} + 0.17453)\} \\ + 0.015\phi_{ASP}^2 \sin \frac{9\phi_{ASP}}{2} \end{array} \right]^{-1}$$

표적의 재질에 따라 달라지는 음향 반향 계수의 경우에는 표면이 철판으로 둘러 싸여있다고 가정하여 본 시뮬레이션에서는 94%로 설정하였다.

④ 탐지 판단

본 시뮬레이션에서는 최대 탐지 거리에서의 반향음의 Power를 기준으로 탐지 여부를 판정하였다. 반향음의 세기는 앞에서의 빔 특성, 거리에 따른 전달손실, 표적세기, 최대탐지 거리를 고려하여 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$P = \frac{\left| \frac{\sin x_t \pi}{x_t \phi} \right| \cos \frac{\theta_t}{2} a^2 b^2 c^2 \bar{R}^2 \left| \frac{\sin x_r \pi}{x_r \phi} \right| \cos \frac{\theta_r}{2} U}{R^4 (a^2 \cos^2 \phi_{ASP} + b^2 \sin^2 \phi_{ASP})^2}$$

최대 탐지 거리에서 표적 세기가 가장 큰 경우에 최소 Power는 다음과 같다.

$$P_{\min} = \frac{a^2 b^2 c^2 \bar{R}^2 \cdot 3.08657}{R^4 (b^2)^2}$$

이때 P/P_{\min} 이 1보다 크면 표적 탐지에 성공했다고 판단한다.

3.3 오차 모형

아 잠수함에서는 적함 탐지 시 추정된 표적 거리, 표적 진행 방향 및 표적 속도에 따라 어뢰를 발사한다. 따라서 아 잠수함에서 추정한 표적 거리, 표적 진행 방향 및 표적 속도는 오차가 존재한다고 가정하였다(Mjeld, 1977; 윤현규, 1996). 오차를 포함한 각 변수의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_{target} &= \mathbf{R}_{target} + \epsilon_R \\ \hat{\phi}_{ASP} &= \phi_{ASP} + \epsilon_\phi \\ \hat{\mathbf{v}}_{target} &= \mathbf{v}_{target} + \epsilon_v \end{aligned}$$

여기서 \mathbf{R}_{target} 은 표적 거리, ϕ_{ASP} 는 공격각, \mathbf{v}_{target} 은 표적 속도를 의미한다. 통계 해석을 위해 표적 거리, 공격각 및 표적 속도의 오차에 대해 오차 모형을 적용하였다. 표적 거리와 공격각은 균일 분포를, 그리고 표적 속도는 정규 분포를 따른다고 가정하였으며, 적용한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_R &\sim U(\epsilon_{R,\min}, \epsilon_{R,\max}) \\ \epsilon_\phi &\sim U(\epsilon_{\phi,\min}, \epsilon_{\phi,\max}) \\ \epsilon_v &\sim U(\epsilon_{v,\min}, \epsilon_{v,\max}) \end{aligned}$$

어뢰 발사 후에는 어뢰의 관성 항법 장치에서 감지된 어뢰 자신의 위치에 따라 각속도 및 각 명령을 구동부로 전달하여 탐색 운동을 수행하므로 관성 항법 장치의 정확도에 따라 탐지 성능이 영향을 받는다. 따라서 관성 항법 장치의 정확도에 따라 선회 각속도에 오차가 존재한다(윤현규, 1996).

선회 각속도의 오차 모형은 관성 항법 장치에 채택된 자이로의 사양에 따라 다음 식과 같이 결정된다.

$$\dot{\beta}_e = (1 + \epsilon_{sf}) \dot{\beta}_r + \epsilon_b$$

- 여기서, $\dot{\beta}_e$: 자이로 출력 각속도
- $\dot{\beta}_r$: 실제 각속도
- ϵ_{sf} : 자이로 척도 오차
- ϵ_b : 자이로 Bias 오차

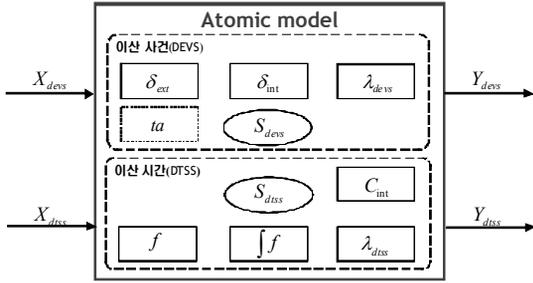


그림 6. 이산 사건/이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조 - Atomic Model(방경운, 2006; 차주환 등, 2008)

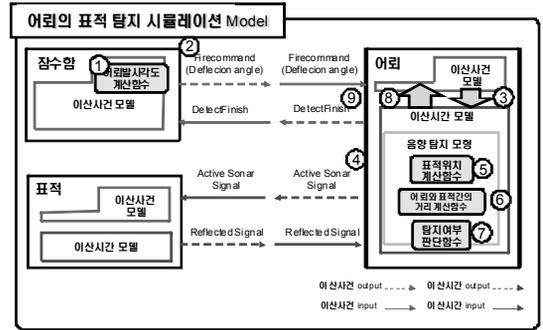


그림 8. 어뢰의 표적 탐지 시뮬레이션 Coupled Model (하술 등, 2009)

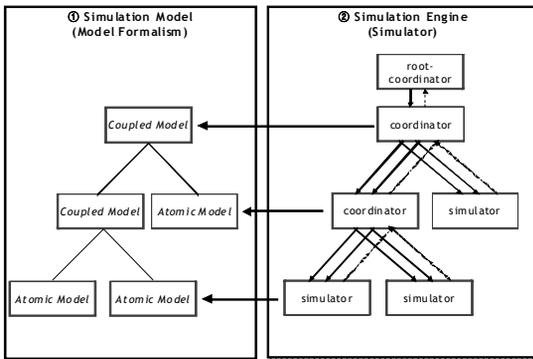


그림 7. 이산 사건/이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조와 엔진(방경운, 2006; 차주환 등, 2008)

4. 이산 사건/이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조를 사용한 유도 어뢰의 표적 탐지 시뮬레이션

4.1 이산 사건/이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델

방경운(2006)과 차주환 등(2008)은 본 논문의 선행 연구로서 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 커널을 개발하였다. 기존의 이산 사건 시뮬레이션 모델에 이산 시간 모델을 정의할 수 있는 부분을 그림 6과 같이 추가하여 혼합형 모델을 개발하였으며, 이를 구동하기 위한 시뮬레이션 엔진도 그림 7과 같이 개발하였다.

4.2 어뢰의 표적 탐지 시뮬레이션 모델의 이산사건/이산시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조 기반 모델링

4.2.1 전체 시뮬레이션 Coupled 모델

어뢰의 표적 탐지 시뮬레이션은 Coupled Model 모델

로써 잠수함, 어뢰, 표적 모델을 하위 모델로 가지고 있으며, 각각의 하위 모델은 이산 사건/이산 시간 혼합형 모델 구조에 따라 정의하였다. 단, 잠수함 모델의 경우에는 매 단위 시간마다 변경해야 할 상태 변수가 없기 때문에 이산 시간을 처리하는 부분을 모델 구조에 포함시키지 않았다. 전체 시뮬레이션 과정과 각 모델 간의 Input/Output 관계는 다음과 같다.

- ① 잠수함 모델의 어뢰 발사각도 계산 함수에서 어뢰 발사각도(Deflection angle)를 계산한다.
- ② 잠수함 모델의 출력 함수에서 어뢰 발사 명령(Firecommand)과 어뢰 발사각도(Deflection angle)를 어뢰의 이산 사건 모델로 전달한다.
- ③ 어뢰 모델은 잠수함 모델로부터 어뢰 발사 명령을 받게 되면 표적의 이산 시간 모델을 호출한다.
- ④ 어뢰의 이산 시간 모델은 매 단위 시간(계산 시간)마다 능동 소나 신호(Active Sonar Signal)를 보내고 이에 대한 반향음(Reflected Signal)을 전달 받는다.
- ⑤ 어뢰의 이산 시간 모델은 매 단위 시간마다 표적 모델로부터 전달 받은 반향음(Reflected Signal)을 이용하여 표적의 위치를 계산한다.
- ⑥ 어뢰 이산 시간 모델은 매 단위 시간마다 표적의 위치 정보를 이용하여 어뢰와 표적 간의 거리를 계산한다.
- ⑦ 어뢰의 이산 시간 모델의 함수에서 계산된 어뢰와 표적 간의 거리는 이산 시간 모델의 탐지 여부 판단 함수로 전달된다. 탐지 여부 판단 함수는 전달 받은 어뢰와 표적 간의 거리 값과 다른 기본 입력 변수들을 이용하여 탐지 여부를 판단한다.

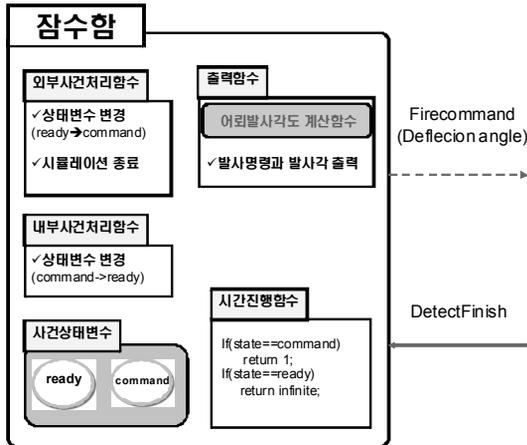


그림 9. 잠수함 모델의 이산 사건/이산 시간 혼합형 모델 구조(하술 등, 2009)

- ⑧ 표적의 탐지되었거나 임무 시간 안에 탐지를 실패 하였을 경우 어뢰의 이산 시간 모델은 동작을 중단 하고 이산 사건 모델을 호출한다.
- ⑨ 호출된 어뢰의 이산 사건 모델은 탐지 종료 신호 (DetectFinish)를 잠수함의 이산 사건 모델로 전달 한다.

4.2.2 잠수함 모델

잠수함 모델은 표적 모델, 어뢰 모델과는 달리 매 단위 시간 마다 변경해야 할 상태 변수가 없기 때문에 이산 시간을 처리하는 부분을 모델 구조를 포함시키지 않았다. 시뮬레이션 엔진에서 시뮬레이션을 시작하면, 출력 함수에 정의한 어뢰 발사각도 계산 함수에 의해 어뢰 발사각 (deflection angle)을 계산하고 어뢰 발사각과 발사 명령 (Firecommand)을 어뢰 모델로 전달한다. 이와 동시에 내부 사건 처리 함수에 의해 사건 상태 변수가 변경된다. 그리고 어뢰 모델로부터 탐지 종료(DetectFinish) 입력이 들어오면 상태 변수를 변경하고 시뮬레이션을 종료하였다.

4.2.3 표적 모델

표적 모델은 어뢰 모델로부터 능동 소나 신호(active sonar signal)가 외부 사건 처리 함수로 들어오면 상태 변수를 변경하고 이산 시간을 처리하는 부분의 'Reflected Signal' 계산 함수에 능동 소나 신호를 입력한다. 'Reflected Signal' 계산 함수에서는 능동 소나 신호를 이용하여 매 단위 시간마다 반사 음향 신호(Reflected Signal)를 계산하며, 이는 'Reflected Signal' 출력 함수를 통해 어뢰 모

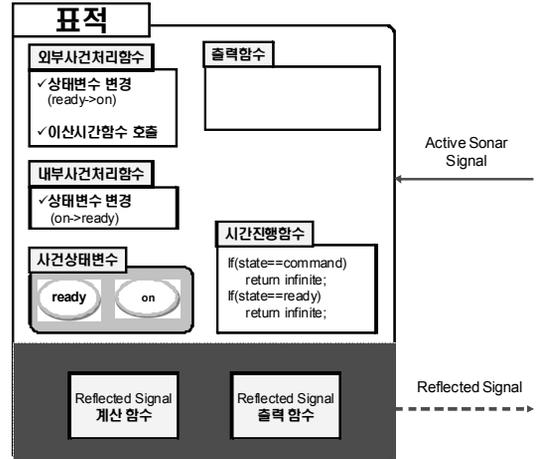


그림 10. 표적 모델의 이산 사건/이산 시간 혼합형 모델 구조(하술 등, 2009)

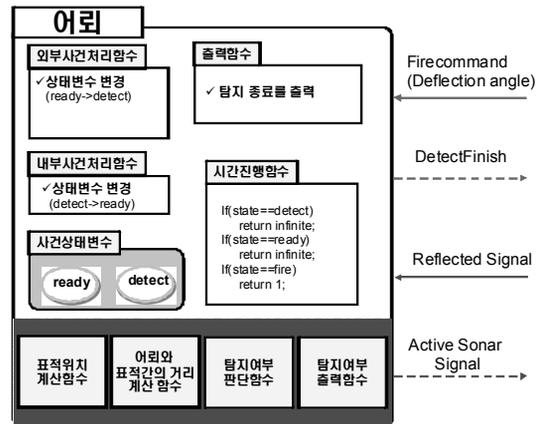


그림 11. 어뢰 모델의 이산 사건/이산 시간 혼합형 모델 구조(하술 등, 2009)

델로 전달된다.

4.2.4 어뢰 모델

어뢰 모델은 잠수함 모델로부터 발사각과 어뢰 발사 명령(Firecommand)이 외부 사건 처리 함수로 들어오면 상태 변수를 변경한다. 또한 능동 소나 신호(Active Sonar Signal)를 매 단위 시간마다 표적 모델로 전달한다. 표적 모델로부터 매 단위 시간마다 반사 음향 신호(Reflected Signal)가 표적 위치 계산 함수로 들어오게 되면 표적 위치를 계산하고 표적 위치 값을 이용하여 어뢰와 표적 간의 거리를 계산한다. 그리고 반사 음향 신호와 여러 가지

변수들을 이용하여 탐지 여부를 계산하여 탐지 여부를 판단한다. 매 단위 시간마다 탐지가 성공했거나 특정 시간 안에 탐지를 성공하지 못할 경우 탐지 여부 판단 함수에 의해 이산 사건을 처리하는 부분의 출력 함수가 호출되어 탐지 종료(DetectFinish)를 잠수함 모델로 전달한다.

4.3 시뮬레이션 실행 및 결과 분석

앞서 구성한 시뮬레이션 모델을 이용하여 표 1과 같이 초기 입력 값을 설정한 후 시뮬레이션을 수행하였다.

초기 입력 값을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 후 어뢰의 기술 변수(어뢰 속도, 최대 탐지 거리)와 표적 변수(표적 크기) 변화에 따른 탐지 확률을 계산하였다. 각 모델을 구성하는 변수들에 적용한 오차 모형은 3.4절에서 정의한 오차 모형을 바탕으로 다음과 같이 설정하였다.

- ① 아 잠수함에서 추정된 공격각: 0~180도 범위에서 30도 간격으로 표준 편차 +15° ~ -15°의 균일 분포를 따르는 오차 값을 적용
- ② 잠수함에서 추정된 표적 거리: 표적 초기 위치 값의 +15% ~ -15% 균일 분포 오차 값 적용
- ③ 잠수함에서 추정된 표적 속도: 표적의 초기 속도에 +3 knots의 정규 분포를 따르는 오차 값을 적용

표 1. 시뮬레이션 수행 시 입력한 어뢰, 표적 모델의 초기 입력 값

| 변수 이름 | 변수 값 |
|--------------------------|-------------|
| 어뢰 속도 | 40 knots |
| 탐색 형태 | 사형 탐색 |
| 최대 탐지 거리 | 1,500m |
| Ping Repetition Interval | 2초 |
| 송신 빔 폭 | 30도 |
| 수신 빔 폭 | 40도 |
| 표적 속도 | 15 Knots |
| 표적 제원 (길이×폭×높이) | 80 × 7 × 7m |
| 발사 거리 | 3,000m |
| 표적 속도 오차 | 3 knots |
| 공격각 오차 | 15도 |
| 선회 각속도 | 6°/sec |
| Sweep 각 | 30° |
| 자이로 척도 오차 | 0 ppm |
| 자이로 Bias 오차 | 0°/hr |
| 계산 시간 간격 | 0.05초 |

- ④ 관성 항법 장치에서 감지된 각속도: 단순화하여 표현된 각속도 오차 모델에 따라 오차 값을 적용

시뮬레이션 시 탐색 방법은 사형 탐색(snake search) 방법을 이용하였으며 몬테칼로 시뮬레이션을 통한 확률 계산을 위해 각 변수 값마다 시뮬레이션을 100회씩 반복 실행하였다. 시뮬레이션 시 공격각이 0도이면 표적이 어뢰 진행 방향으로 마주 오는 경우이며, 공격각이 180도이면 어뢰가 표적의 후미에서 탐색하는 상황이다.

4.3.1 시뮬레이션 실행 결과 검증

시뮬레이션 실행 후 결과를 분석하기에 앞서 시뮬레이션 시 적용한 어뢰의 탐색 방법이나 표적의 위치 변화가 올바르게 적용되는가를 검증(Verification)하기 위해 표적의 위치, 어뢰의 선회 속도, 어뢰의 위치를 매 단위 시간마다 출력하여 그래프로 나타내었다.

① 표적의 위치 변화

표적은 가정에 따라 속도와 진행 방향이 변하지 않기 때문에 초기 속도와 초기 공격각을 유지한 채 직진 운동을 한다. 그림 12는 시뮬레이션 수행 과정에서 표적의 위치를 출력하여 그래프로 나타낸 것이다.

② 어뢰의 선회 속도와 위치 변화

어뢰는 표에 나와 있는 기본 값을 바탕으로 특정 sweep 각(30°)과 선회 각속도(6°/sec)에 따라 선회 속도를 가지게 된다. 그림 13은 시뮬레이션 수행 과정에서 어뢰의 선회 속도를 출력하여 그래프로 나타낸 것이다. 선회 속도에 따라 변화하는 어뢰의 위치는 그림 14와 같다.

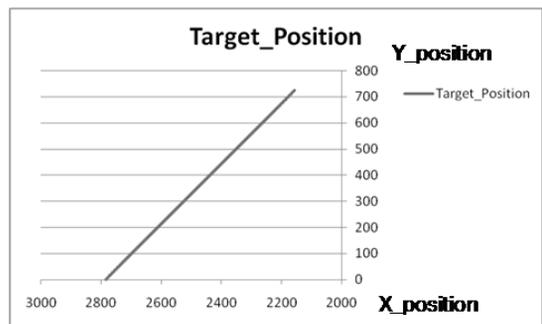


그림 12. 시뮬레이션 결과: 시간에 따른 표적의 위치 변화

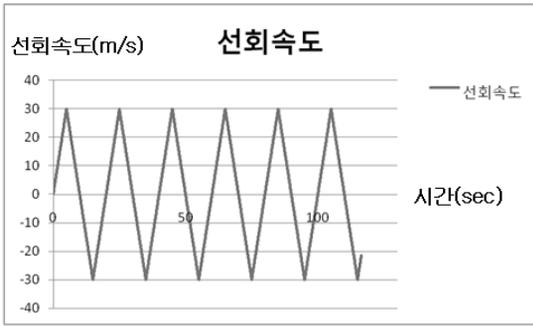


그림 13. 시뮬레이션 결과: 시간에 따른 어뢰의 선회 속도

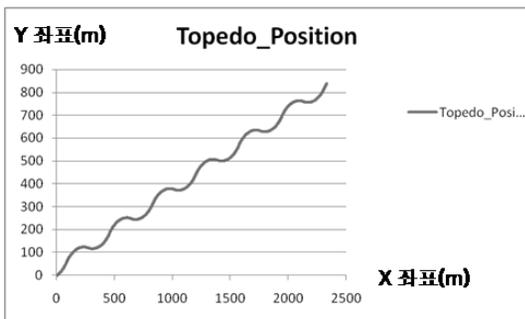


그림 14. 시뮬레이션 결과: 시간에 따른 어뢰의 위치 변화

4.3.2 시뮬레이션 실행 결과 분석

시뮬레이션 결과 다음의 3가지 변수의 변화에 따른 탐지 확률 변화를 확인하였다.

- 어뢰의 속도: 30, 35, 40, 45 knots
- 어뢰의 탐지 거리: 1,000m, 1,500m, 2,000m, 2,500m
- 표적의 속도: 10, 15, 20, 25 knots

① 어뢰의 속도 변화

어뢰의 속도가 30, 35, 40, 45 knots 일 때 공격각(attack angle) 변화에 따른 탐지 확률 변화는 그림 15과 같다.

그림 15에서 볼 수 있듯이 어뢰의 속도가 빠를수록 탐지 확률이 좋아짐을 알 수 있으며, 특히 공격각이 0°이고 어뢰의 속도가 35 knots일 때 가장 좋은 탐지 확률을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

② 어뢰의 최대 탐지 거리 변화

어뢰의 최대 탐지 거리를 1,000, 1,500, 2,000, 2,500m 일 때 공격각 변화에 따른 탐지 확률의 변화는 그림 16과 같다. 그림 16에서 볼 수 있듯이 어뢰의 최대 탐지 거리가 늘어날수록 탐지 확률이 좋아지는 것을 알 수 있다. 또한

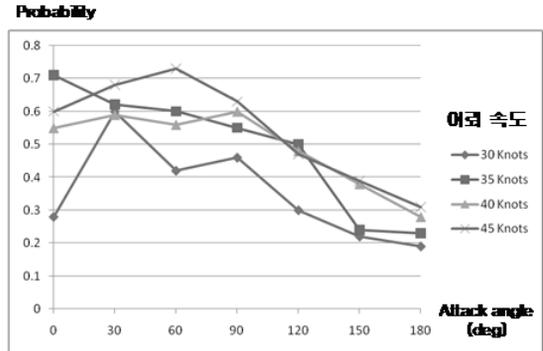


그림 15. 시뮬레이션 결과: 어뢰의 속도 변화에 따른 탐지 확률 변화

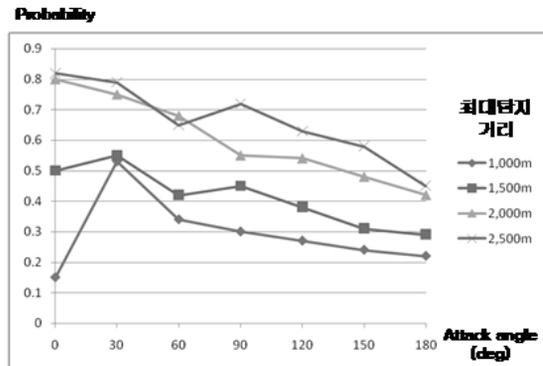


그림 16. 시뮬레이션 결과: 어뢰의 최대 탐지 거리 변화에 따른 탐지 확률 변화

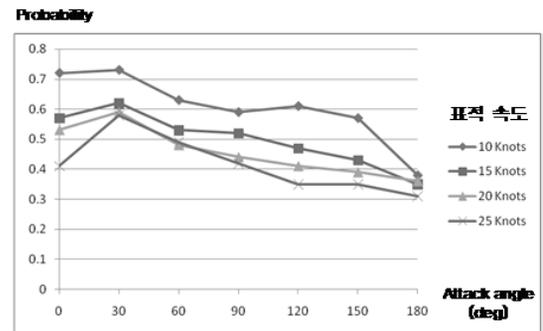


그림 17. 시뮬레이션 결과: 표적의 속도 변화에 따른 탐지 확률 변화

최대 탐지 거리가 1,500m에서 2,000m로 증가할 때 탐지 확률이 다소 크게 좋아지는 것을 확인할 수 있다.

③ 표적의 속도 변화

표적의 속도가 10, 15, 20, 25 knots 일 때 공격각 변화에 따른 탐지 확률의 변화는 그림 16과 같다. 그림 16에서 볼 수 있듯이 표적 속도가 느릴수록 탐지 확률이 대체적으로 좋아지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

본 논문에서는 이산 시간/이산 사건 혼합형 시뮬레이션 모델 구조와 탐지 효과도 해석과 관련한 탐지 확률 계산 기법을 이용하여 유도 어뢰의 탐지 효과도를 분석하였다. 그리고 시뮬레이션 결과를 분석해 본 결과, 주요 변수인 어뢰의 속도의 증가, 최대 탐지 거리의 증가, 표적의 속도의 증가에 따라 탐지 확률이 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

추후에는 다른 심도에 위치하는 적 잠수함과 적 수상함을 대상으로 하고, 표적이 어뢰에 대한 회피 기동을 수행한다는 가정 하에서 보다 다양한 탐색 방법을 사용하여 효과도를 분석하고자 한다. 그리고 보다 정확한 어뢰의 효과도 분석을 위해 공학 수준에서 표적 모델, 어뢰 모델을 정의하고 ‘탐지-식별-추적-격침’으로 진행되는 어뢰 공격 및 운용에 관련된 전체 시나리오를 구성하여 어뢰의 공격/운용/대항 시뮬레이션을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 (a) 국방과학연구소 차기중어뢰 탐색 개발 사업 과제 “차기중어뢰 효과도 분석 및 M&S 적용기술 연구”, (b) 국방과학연구소 수중운동체기술특화센터 SM-11과제 “수중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상(Virtual) 복합 시스템 모델 구조(Architecture) 연구”, (c) 서울대학교 BK21 해양기술인력양성사업단, (d) 서울대학교 해양시스템공학 연구소의 지원으로 이루어진 연구 결과의 일부임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 방경운, 조선공정계획용 이산 사건과 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 프레임워크, 석사 학위 논문, 서울대학교, 2006년.
 2. 윤현규, 어뢰 탐지 효과도 분석 기법 연구, 국방과학연구소

기술보고서, NWS-519-960331, 1996년.
 3. 이규열 외, 수중운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상 복합 시스템 모델구조 연구, 수중운동체 특화연구센터 SM-11과제 1단계 최종보고서, 국방과학연구소, TECD-413-050663, 2006년.
 4. 이성은, 잠수함 전투체계 설계, 함정설계특강, 서울대학교, 2008년.
 5. 차주환, 노명일, 방경운, 이규열, “조선 공정 계획의 수립 완성도 향상을 위한 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 프레임워크”, 한국시뮬레이션학회논문지, 17(4), pp. 71-80, 2008년.
 6. 하술, 이규열, 이현진, 차주환, 오차 모델을 적용한 교전급 모델에 대한 어뢰 효과도 분석용 분산 시뮬레이션 S/W 프로토타입 개발, 서울대학교 선박설계자동화연구실 내부기술보고서, 2009년.
 7. 함승호, 차주환, 이규열, 박광필, 노명일, “이산 사건 및 역학기반 이산 시간 혼합형 모델링에 의한 잠수함의 잠항 부상 시뮬레이션”, 2008년도 대한조선학회 추계학술발표회, 창원, pp. 163-171, 2008년.
 8. 허성필, “통계적 메타모델을 이용한 어뢰의 탐지확률 분석”, 한국경영과학회 1996년 학술대회논문집, 제2권, pp. 147-150, 1996년.
 9. 허성필, 홍우영, 박영일, “전술상황 및 어뢰 변수가 표적 탐지 확률에 미치는 영향”, 제 1회 해양 무기체계 발전세미나, 국방과학연구소, pp. 217-222, 1996년.
 10. Cho, D. Y., Son M. J., Kang, J. H., Lee, S. J., Cham J. H., Yoo, S. J., Lee, H. K., Lee, K. Y., Kim, T. W., and Ko, Y. S., “Analysis of a submarine’s evasive capability against an antisubmarine warfare torpedo using DEVS modeling and simulation”, Spring Simulation Multiconference 2007, DEVS Integrative M&S Symposium (DEVS), Norfolk Marriott Waterside, Norfolk, Virginia, USA, pp. 307-315, 2007.
 11. EDS Defence Limited, THOR - Torpedo Engagement Simulation Model Commercial Version E2: Functional Specification, IC07065/CE2/D1, EDS Defence Limited, 1993.
 12. Mjelde, A., A Homing Torpedo: The Effect of the Tactical Situation and the Torpedo Parameters on the Torpedo Effectiveness, Master Thesis, Navy Postgraduate School, 1977.
 13. Robinson, T., “ODIN - an underwater warfare simulation environment,” Proceedings of the Winter Simulation Conference, Vol.1, pp. 672-679, 2001.
 14. Urick, R. J., Principles of Underwater Sound, 1967.



하 솔 (hasol81@snu.ac.kr)

2003 서울대학교 조선해양공학과 학사

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 수중운동체(잠수함, 어뢰)



이 규 열 (kylee@snu.ac.kr)

1971 서울대학교 공과대학 조선공학과 학사

1975 독일 하노버 공과대학 조선공학 석사(Dipl.-Ing.)

1982 독일 하노버 공과대학 조선공학 박사(Dr.-Ing.)

1975~1983 독일 하노버 공과대학 선박설계 및 이론연구소, 주정부 연구원

1983~1994 한국기계연구원 선박해양공학연구센터, 선박설계, 생산자동화 연구사업(CSDP) 단장

1994~2000 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 부교수

2000~현재 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 교수

관심분야: 최적 선박 설계, 형상 모델링, Offshore structure, Dynamics & control



차 주 환 (jhcha79@snu.ac.kr)

2002 서울대학교 조선해양공학과 학사

2004 서울대학교 대학원 조선해양공학과 석사

2008 서울대학교 대학원 조선해양공학과 박사

2008~현재 서울대학교 공학연구소 연구원

관심분야: 선박설계, 최적설계, 모델링&시뮬레이션, 다물체계 동역학